

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Universidad  
Carlos III de Madrid

# Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidables

Trabajo de fin de grado

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Alejandro Migueláñez Rosa

Tutor: Xavier Soldani

Leganés, Julio de 2015





## Resumen

Las aleaciones ferrosas, en particular los aceros, representan de lejos el material metálico más usado. Los aceros inoxidables destacan por tener la característica de no presentar corrosión fácilmente cuando son expuestos al ambiente. Debido a la popularidad que este material ha alcanzado en los últimos años, es preciso poseer un conocimiento pleno del comportamiento de éste cuando se va a fabricar una pieza con el fin de conseguir mejores calidades y reducir costes de fabricación.

Para conocer el comportamiento de un material es preciso realizar ensayos experimentales en el laboratorio. Sin embargo, esto resulta muy costoso. Como alternativa, se realizan estos ensayos mediante métodos numéricos, obteniendo resultados muy parecidos a los que se tendrían en ensayos experimentales.

Se realizarán ensayos numéricos que permitan predecir el comportamiento de los aceros inoxidables en las condiciones de mecanizado. Actualmente, el acero inoxidable más ampliamente usado es el acero 304, y su variante, el acero 304L, por lo que son éstos los estudiados en el presente proyecto. Ambos metales se usan indistintamente ya que sus propiedades y sus comportamientos son muy parecidos.

Las simulaciones numéricas, a través del *software Abaqus/Explicit*, proporcionarán resultados que posteriormente serán tratados para esclarecer el comportamiento durante el mecanizado del acero 304/304L, y validados por la literatura existente.

Palabras clave: simulación numérica, acero inoxidable, mecanizado



## Abstract

Ferrous alloys, particularly steels, represent by far the most widely used metallic material. Stainless steels stand out as having the characteristic of not easily corroded when they are exposed to the environment. Due to the popularity of this material has achieved in recent years, it's necessary have a full understanding of the behavior of it when you are making a piece in order to achieve better quality and reduce manufacturing costs.

Ideally, if you pretend to understand the behavior of a material, you need to carry out experimental tests in the laboratory. However, this is very expensive. Alternatively, these tests are performed using numerical methods on computers, obtaining very similar results to the experimental tests.

Numerical tests will be carry out to predict the behavior of stainless steels in the machining conditions. Nowadays, the most widely stainless steel used is SS304, and its variant, SS304L, so there are those studied in this project. Both metals are used interchangeably because their properties and behavior are very similar.

Numerical simulations will provide results through *Abaqus/Explicit* software that later will be processed to clarify the behavior of SS304/304L and validated by literature.

**Keywords:** numerical simulation, stainless steel, machining



## Índice

Capítulo I.....	7
1. Introducción.....	7
1.1. Motivación .....	7
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Fases de desarrollo .....	10
1.4. Medios empleados .....	10
1.5. Estructura de la memoria .....	10
Capítulo II.....	12
2. Estado del arte .....	12
2.1. Aceros inoxidables.....	12
2.1.1. Acero inoxidable 304/304L.....	13
2.1.1.1. Composición y propiedades.....	13
2.1.1.2. Maquinabilidad.....	14
2.1.1.3. Aplicaciones .....	15
2.2. Mecanizado .....	18
2.2.1. Mecanizado a Alta Velocidad .....	19
2.2.2. Parámetros de corte .....	21
2.2.3. Corte ortogonal y corte oblicuo.....	21
2.2.3.1. Ángulos.....	23
2.2.3.2. Velocidades .....	24
2.2.3.3. Fuerzas.....	25
2.2.4. Viruta.....	26
2.3. Modelo de comportamiento: Johnson–Cook .....	27
2.4. Método de elementos finitos.....	29
Capítulo III .....	31
3. Estudio experimental .....	31
3.1. Corte ortogonal experimental de acero 304/304L.....	31
3.2. Presiones específicas de corte y avance.....	31
3.3. Espesor de viruta.....	35
3.4. Longitud de contacto .....	36
Capítulo IV .....	37
4. Modelo numérico.....	37
4.1. Características del modelo .....	37



## *Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidables*

---

4.1.1. Mallado.....	37
4.1.2. Parámetros geométricos .....	39
4.1.3. Condiciones de contorno y parámetros de corte .....	39
4.2. Características del material .....	40
4.2.1. Propiedades .....	40
4.2.2. Parámetros de Johnson–Cook .....	40
Capítulo V .....	42
5. Validación y resultados .....	42
5.1. Descripción de las simulaciones y resultados a analizar .....	42
5.2. Validación.....	44
5.3. Estudio de comportamiento en mecanizado del material original .....	46
5.3.1. Fuerzas de corte y de avance.....	46
5.3.2. Morfología de viruta.....	49
5.3.3. Espesor de viruta .....	50
5.3.4. Longitud de contacto.....	51
5.3.5. Ángulo de cizallado.....	54
5.4. Estudio paramétrico sobre la sensibilidad a la temperatura.....	55
5.4.1. Fuerzas de corte y de avance.....	55
5.4.2. Morfología de viruta.....	57
5.4.3. Espesor de viruta .....	59
5.4.4. Longitud de contacto.....	60
5.4.5. Ángulo de cizallado.....	61
Capítulo VI.....	62
6. Conclusiones y trabajos futuros.....	62
6.1. Conclusiones.....	62
6.2. Trabajos futuros .....	63
7. Presupuesto.....	64
8. Bibliografía.....	67



# Capítulo I

## 1. Introducción

El primer capítulo tratará de dar una visión general de los motivos por los que se ha llevado a realizar este trabajo, además de los objetivos que se pretenden conseguir. Se comentarán de forma somera las fases que se llevaron a cabo durante la elaboración del trabajo, así como los medios que fueron utilizados. En último lugar, este capítulo mostrará la estructura en que se ha redactado la presente memoria.

### 1.1. Motivación

Se trata de uno de los metales que más importancia ha conseguido en el último siglo en el ámbito ingenieril. La elevada resistencia mecánica, el aguante frente a temperaturas extremas, las propiedades higiénicas y, sobre todo, su resistencia a la corrosión, le confieren la posibilidad de posicionarse como uno de los metales más polivalentes. Desde su descubrimiento en el siglo XIX, su importancia en el mundo ingenieril ha ido en aumento.

En la actualidad el Instituto Americano del Hierro (AISI) enumera aproximadamente 60 tipos convencionales. Sin embargo, los aceros inoxidables más ampliamente usados son el tipo 304 y 304L. Pertenecen a la serie 300, caracterizados por ser aceros austeníticos, con una composición básica de un 18% de cromo y un 8% de níquel, por lo que también son conocidos como aceros 18/8. El primero de los aleantes es el responsable de la elevada resistencia a la corrosión, mientras que el segundo le proporciona la capacidad de ser soldado y una mejora de la tenacidad, la ductilidad y la resistencia a la fatiga, además de mejorar la resistencia a la corrosión en líquidos no oxidantes. Ambos tienen una composición química muy similar y es habitual que las propiedades mecánicas se incluyan en un único certificado.

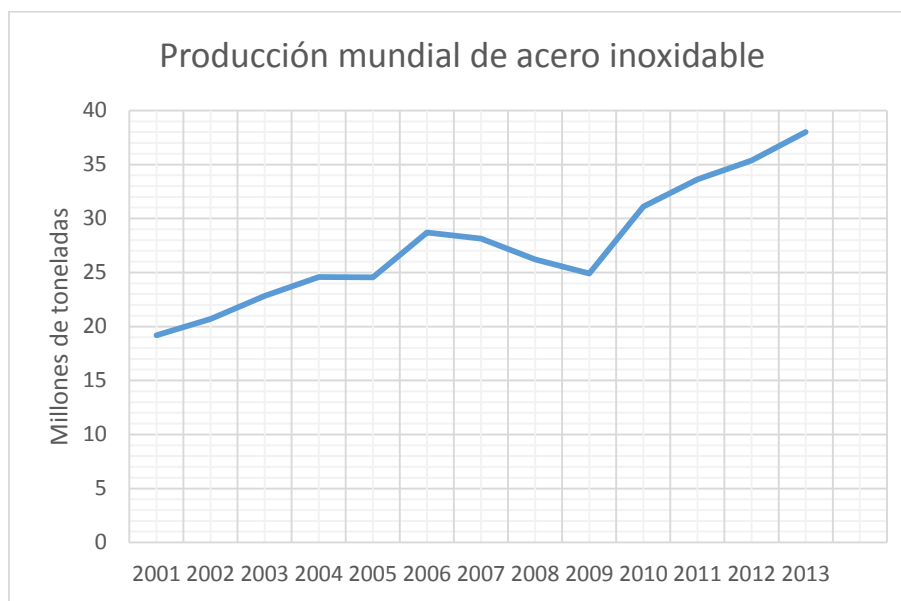
Unas veces elegido por sus propiedades higiénicas, otras por su resistencia a la corrosión o, incluso, elegido por su estética. Las aplicaciones del acero inoxidable son de lo más variadas:

- Aplicaciones que necesitan protección contra atmósferas corrosivas.
- Medicina.
- Minería, industria química y generación de electricidad.
- Menaje de cocina, accesorios de baño y material de oficina.
- Aplicaciones estructurales y mobiliario urbano.
- Industria automovilística y aeroespacial.



## Capítulo I – Introducción

Si bien es cierto que hay materiales mejores para estas aplicaciones, el coste de producción del acero inoxidable es mucho menor respecto a otros, en parte debido a la popularidad que ha ido alcanzando en los últimos años. A pesar de que en la producción mundial el acero inoxidable supone únicamente un 2% del total de producción de acero [1], [2], se ha duplicado desde el año 2001, como se observa en la *Figura 1.1*, y esto se puede traducir en un incremento de la importancia de este metal.



*Figura 1.1 – Producción mundial de acero inoxidable [2]*

Además, el acero inoxidable es una opción mucho más barata si se puede escoger entre diversos metales que ofrezcan unas buenas prestaciones. Si se atiende a una comparación de primer coste como la mostrada en la *Figura 1.2*, se puede observar que, aunque éste es 6 veces más caro que el acero ordinario, es comparable al primer coste del cobre y a las aleaciones de aluminio. Lejos quedan las aleaciones de titanio y níquel, que aunque presentan unas mejores propiedades en todos los aspectos, su precio con respecto al acero inoxidable es demasiado alto.



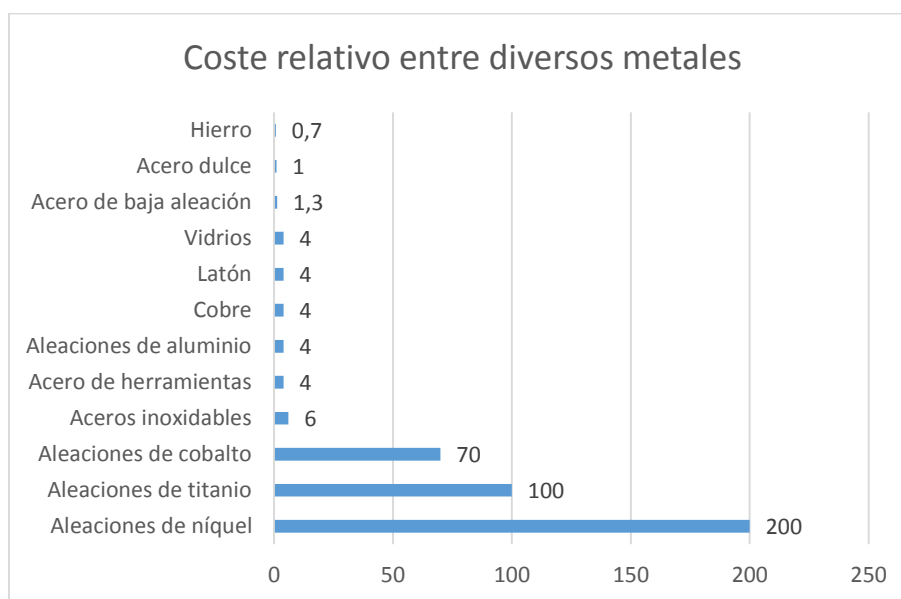


Figura 1.2 – Coste relativo entre diversos metales [3]

Su ciclo de vida es otra característica a tener en cuenta. Aunque la utilización del acero inoxidable a priori puede ser cara para, por ejemplo, la fabricación de menaje de cocina y baño, también es cierto que este material requiere un mantenimiento muy pequeño durante su vida en servicio. Esto se debe a la característica principal de estos aceros, la cual es su resistencia a la corrosión.

Por otro lado, la maquinabilidad de los aceros inoxidables es distinta según la cantidad de aleantes que lleve, el tratamiento térmico y el proceso de fabricación. En general, los aceros de la serie 300, que son austeníticos, son difíciles de mecanizar debido a estas razones.

Por tanto, se hace necesario realizar estudios que permitan mejorar el coste de fabricación de piezas en las que el acero 304/304L esté presente. En concreto, se procederá a estudiar el comportamiento de este material durante el mecanizado mediante simulaciones en el *software Abaqus/Explicit*, con un modelo simplificado en corte ortogonal, es decir, en dos dimensiones.

## 1.2. Objetivos

Este proyecto tiene tres objetivos:

- El objetivo principal trata de estudiar el comportamiento en condiciones de mecanizado del acero 304/304L mediante un modelo numérico. Los análisis se realizarán simulando un mecanizado a baja y a alta velocidad de corte en corte ortogonal, mediante el *software Abaqus/Explicit*.
- A su vez, se valida el modelo original comparando los resultados obtenidos numéricamente con los experimentales de la literatura.



## Capítulo I – Introducción

- Se realiza un pequeño estudio paramétrico sobre uno de los factores que define el comportamiento del material en *Abaqus/Explicit*, en concreto el que influye sobre la sensibilidad a la temperatura.

El análisis de los resultados de las simulaciones proporciona una reducción de tiempo de cálculo así como su coste para trabajos futuros sobre este material.

### 1.3. Fases de desarrollo

Como se ha dicho anteriormente, el proyecto se realiza sobre simulaciones numéricas en *Abaqus/Explicit*. Para ello, en primer lugar se definen diferentes parámetros característicos del material a estudiar, como son aquellos que especifican las propiedades mecánicas y las propiedades térmicas. También se fijan los parámetros de la ley de comportamiento de Jonhson–Cook, que se explicará más adelante, y los parámetros de corte de avance y profundidad. Como lo que se pretende estudiar es el comportamiento del material a baja y alta velocidad de corte, se ha ido variando ésta en las distintas simulaciones.

Una vez realizadas las simulaciones se procede a analizar la influencia que tiene la velocidad de corte sobre las fuerzas del mecanizado, la morfología y el espesor de la viruta, y el ángulo de cizallado, entre otros. Para asegurar la fiabilidad de los resultados, se comparan éstos con los obtenidos experimentalmente a través de la literatura, teniendo en cuenta las condiciones de cada uno de los experimentos con respecto a los casos estudiados numéricamente.

Al realizar la búsqueda de los parámetros de la ley de comportamiento se ha observado que uno de ellos, el que define la sensibilidad a la temperatura, alcanza a tener un amplio rango de valores entre los juegos de parámetros encontrados. Por esta razón, se decide realizar un estudio de este parámetro con el fin de esclarecer la importancia que pudiese tener a la hora de analizar los resultados de las simulaciones.

### 1.4. Medios empleados

Como se ha mencionado anteriormente, este proyecto se ha basado en simulaciones numéricas. El programa con el que se llevaron a cabo dichas simulaciones es el *software Abaqus/Explicit*, un código comercial que, mediante el método de elementos finitos, es capaz de simular con gran fidelidad los resultados de un experimento real, como es este caso. La utilización de este programa permite acelerar los tiempos de ensayo y abaratar los costes que supondría realizar un ensayo real, ya que sus resultados se aproximan bastante a la realidad.

### 1.5. Estructura de la memoria

La memoria del proyecto se encuentra estructurada en varios capítulos con sus correspondientes apartados. A continuación se da un resumen de cada capítulo, excluyendo el primero ya que se trata de la presente introducción:



## Capítulo I – Introducción

- Capítulo II, Estado del arte. Este capítulo sienta las bases teóricas sobre las que se ha desarrollado el presente proyecto. Se da una descripción de los aceros inoxidable, y posteriormente se especifican las características del acero 304/304L, escogido para realizar las simulaciones numéricas. También se explica el concepto de mecanizado y los parámetros de corte que lo caracterizan. Por último, se dedican un par de apartados para explicar el modelo de comportamiento del acero 304/304L y el método de los elementos finitos.
- Capítulo III, Estudio experimental. A lo largo de este capítulo se muestra una recopilación de información sobre datos experimentales de corte ortogonal con acero 304/304L encontrados en la literatura. Se dará una pequeña descripción de cada artículo utilizado con el fin de conocer el estado en que se encuentra actualmente el estudio del mecanizado sobre este metal.
- Capítulo IV, Modelo numérico. El cuarto capítulo trata de definir el modelo numérico utilizado para las simulaciones en *Abaqus/Explicit*, así como una especificación de los parámetros de entrada como son las propiedades del material y de la herramienta, y el juego de parámetros utilizado para la ecuación que define el modelo de comportamiento.
- Capítulo V, Validación y resultados. El penúltimo capítulo contiene la información referente a las simulaciones que se han realizado, y constituye la parte más importante del proyecto. En este capítulo se explica la metodología usada para el tratamiento de los resultados de las simulaciones, se muestra el proceso de validación de éstos y se analiza en detalle algunos de los parámetros de salida, separando estos análisis en dos estudios diferentes.
- Capítulo VI, Conclusiones y trabajos futuros. El último capítulo del proyecto tiene como objetivo realizar una recapitulación de las conclusiones que se han ido obteniendo al analizar en detalle determinados parámetros de las simulaciones. Además, incluye un apartado donde se proponen trabajos futuros cuyo estudio puede resultar de gran interés en el proceso de mecanizado del acero 304/304L, y que pueden ayudar a complementar este proyecto.



# Capítulo II

## 2. Estado del arte

Este capítulo sienta las bases teóricas sobre las que se ha desarrollado el presente proyecto. Para facilitar la lectura se ha dividido en cuatro apartados. En el primero se da una descripción de los aceros inoxidables, y posteriormente se especifican las características del acero inoxidable 304/304L, escogido para realizar las simulaciones numéricas. En segundo lugar, se explica de forma somera el concepto de mecanizado y los métodos para el cálculo de los parámetros de corte, especialmente la condición de corte ortogonal. El tercer apartado ocupa una explicación acerca del comportamiento del material. En último lugar se definirá en que consiste el método de los elementos finitos, que es el método de cálculo que utiliza *Abaqus/Explicit*.

### 2.1. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se caracterizan por su resistencia a la corrosión, su alta resistencia y ductilidad, así como por su elevado contenido de cromo. Se les llama inoxidables porque, en presencia de oxígeno, desarrollan una película de óxido de cromo que protege al metal de la corrosión. Esta película protectora se vuelve a acumular en caso de que se raye la superficie. Para que este hecho se produzca, el contenido mínimo de cromo debe ser de un 10% a un 12% en peso [4].

Además del cromo, el acero inoxidable contiene otros aleantes que permiten una mejora de las propiedades. Los principales son el níquel y el molibdeno. Algunas de las mejoras que producen estos elementos son:

- Elevación de la resistencia general a la corrosión en medios no oxidantes.
- Mejora de la tenacidad y la ductilidad.
- Aumento de la resistencia a temperaturas elevadas.
- Mejora de la capacidad de ser soldado.

La letra *L* se utiliza para identificar los aceros de bajo porcentaje de carbono. A mayor contenido de carbono, menor es la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables, debido a que se combina con el cromo y forma carburos de cromo, anulando los efectos que tiene éste como aleante.

Los aceros inoxidables se dividen en cinco tipos [4]:

- Austeníticos. Comprenden las series 200 y 300. Los principales aleantes en este tipo de aceros son, además del cromo, el níquel y el manganeso. No son



magnéticos y tienen una excelente resistencia a la corrosión. Los aceros inoxidables austeníticos se endurecen mediante el trabajo en frío. Son los más dúctiles y se pueden formar con facilidad, lo que permite una amplia variedad de aplicaciones, como los artículos de cocina, construcción soldada, equipo ligero de transporte, etc.

- Ferríticos. Abarcan la serie 400. Tienen un alto contenido en cromo, hasta un 27%, son magnéticos y su ductilidad es más baja que la de los aceros austeníticos. Se endurecen mediante trabajo en frío y no se les puede dar tratamiento térmico. Se utilizan en aplicaciones no estructurales, como equipo para cocina y guardabarros de automóviles.
- Martensíticos. Ocupan la series 400 y 500. La mayoría de este tipo de aceros carecen de níquel y se endurecen mediante tratamiento térmico. Su contenido en cromo puede llegar hasta el 18%, son magnéticos y tienen alta resistencia mecánica, dureza y resistencia a la fatiga, buena ductilidad y resistencia moderada a la corrosión. Generalmente se utilizan en herramientas quirúrgicas, válvulas y resortes.
- De endurecimiento por precipitación. También llamados PH por sus siglas en inglés. Contienen cromo y níquel principalmente, junto con cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Se caracterizan por una alta resistencia a temperaturas elevadas, por lo que sus principales aplicaciones se dan en aeronaves y componentes estructurales aeroespaciales.
- De estructura dúplex. Tienen una mezcla de austenita y ferrita. Poseen una mayor resistencia a la corrosión que los aceros austeníticos de la serie 300. Se aplican en plantas de tratamientos de aguas y en componentes de intercambiadores de calor.

### 2.1.1. Acero inoxidable 304/304L

El acero 304/304L es el acero inoxidable de uso más común hoy en día. Su popularidad ha hecho que no haya otro grado de acero inoxidable que se oferte en tantas formas y acabados. Las propiedades del acero inoxidable 304 ofrecen características materiales únicas a un precio competitivo, convirtiéndolo en la primera opción en muchas aplicaciones.

Por estas razones, y como se dijo en anteriores apartados, éste es el acero inoxidable utilizado en las simulaciones numéricas. A continuación se da la composición y las propiedades de este acero, y algunas de sus aplicaciones más comunes.

#### 2.1.1.1. Composición y propiedades

A continuación se muestra la composición de los aceros 304 y 304L en la *Tabla 2.1* y en la *Tabla 2.2*, respectivamente.

*Tabla 2.1 – Composición del acero 304 [5]*

Acero		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>
<b>AISI</b>	Mínimo	—	—	—	—	—	18%	8%	74%
<b>304</b>	Máximo	0.08%	2%	0.045%	0.03%	1%	20%	10.50%	66.345%



Tabla 2.2 – Composición del acero 304L [5]

Acero		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>
AISI	Mínimo	—	—	—	—	—	18%	8%	74%
304L	Máximo	0.02%	2%	0.045%	0.03%	1%	20%	10.50%	66.405%

Como ya se dijo, y como se puede ver en las tablas anteriores, el acero 304 y el acero 304L únicamente difieren en su porcentaje de carbono. Las propiedades físicas que presentan ambos aceros son muy similares. Por ello, en la Tabla 2.3 sólo aparece un valor para cada propiedad, válido para ambos.

Tabla 2.3 – Propiedades físicas del acero 304/304L [5]

Densidad ( $kg/m^3$ )	7.9
Módulo de Elasticidad ( $GPa$ )	193
Resistencia a tracción ( $MPa$ )	585
Límite elástico ( $MPa$ )	240
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	500
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	16.2
Coefficiente de dilatación térmica ( $K^{-1}$ )	$17.2 \cdot 10^{-6}$
Temperatura de fusión ( $^{\circ}C$ )	1400 – 1450

#### 2.1.1.2. Maquinabilidad

En general, la maquinabilidad de los aceros inoxidables depende de los tipos y la cantidad de aleantes que presenta el acero en cuestión, y ésta suele reducirse al aumentar el contenido de aleantes. La maquinabilidad de los aceros austeníticos, que es el tipo al que pertenece el acero 304/304L, se puede observar en la Figura 2.1 en comparación con los demás tipos de aceros inoxidables.

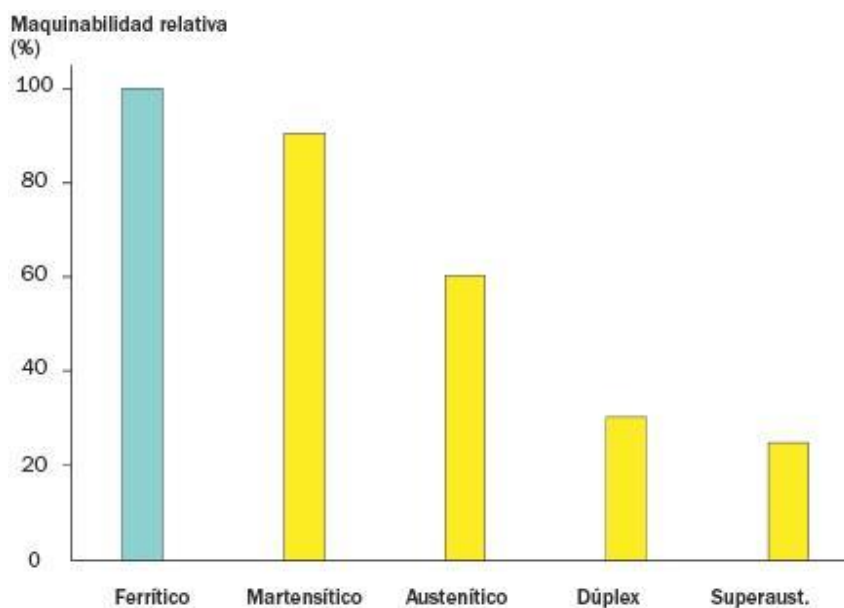


Figura 2.1 – Maquinabilidad de distintos tipos de acero inoxidable [6]



Los aceros inoxidable producen virutas largas, continuas y tenaces, que resultan difíciles de romper [6]. En general, el mecanizado de los aceros austeníticos es problemático: el proceso genera capas superficiales muy duras tras cada pasada de mecanizado. Esta capa debe ser eliminada por la herramienta en la siguiente pasada, lo que conduce a un desgaste de entalladura en la línea de la profundidad de corte. Por ello se necesitan máquinas y herramientas de gran rigidez. La adición de azufre en el acero 304/304L sirve para mejorar su maquinabilidad.

#### *2.1.1.3. Aplicaciones*

La elevada resistencia a la corrosión y su resistencia mecánica son las principales propiedades que posee el acero 304/304L, como ya se dijo anteriormente. La capa protectora que se forma gracias al cromo le aporta un comportamiento químicamente inerte ante algunas sustancias. Todas estas características posibilitan que este metal sea utilizable de forma doméstica en el hogar, así como en los hospitales e incluso en el arte, entre otras aplicaciones. En los siguientes apartados se dan ejemplos específicos y algunas fotografías para muestra de sus aplicaciones.

#### **Aplicaciones industriales**

La industria química y petroquímica sale beneficiada al usar este metal ya que se comporta de manera inerte ante determinadas sustancias de trabajo. Es usado, por ejemplo, en autoclaves, plantas de biogás e intercambiadores de calor.

Es muy utilizado en el ámbito de la agricultura por sus propiedades higiénicas. Se emplea en contenedores de comida y bebida para los animales, así como equipos avanzados de extracción de leche.



*Figura 2.2 – Autoclave [7]*



*Figura 2.3 – Intercambiador de calor [8]*





*Figura 2.4 – Equipo de alta tecnología para extracción de leche [9]*

### **Aplicaciones médicas**

El acero 304/304L ofrece muchas ventajas en la industria médica. La alta resistencia a la corrosión y las propiedades antibacteriales permiten que sea un metal muy higiénico, además de que en su vida en servicio no presenta manchas, por lo que puede ser limpiado y reutilizado muchas veces. Por otro lado, el hecho de que no sea un metal magnético lo hace perfecto para operar implantes en el cuerpo.

Donde más presente está es en los objetos de instrumentación: agujas, jeringuillas y catéteres, entre otros.



*Figura 2.5 – Instrumentos médicos [10]*

### **Aplicaciones domésticas**

En la cocina y en el baño es donde más está presente este acero. Quizás sea la aplicación más conocida por todos. Al igual que en la industria médica, sus propiedades le permiten ser un metal muy higiénico, y es ideal para evitar contaminar la comida cuando ésta es cocinada y para todos aquellos objetos que puedan estar en contacto con agua.





*Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidables*  
Capítulo II – Estado del arte



*Figura 2.6 – Batería de cacerolas [11]*



*Figura 2.7 – Accesorios de cuarto de baño [12]*



*Figura 2.8 – Cubertería de acero inoxidable [13]*

### **Aplicaciones artísticas**

Gracias a su estética, el acero 304/304L se ha hecho un hueco en el mundo del arte. Combinado con sus propiedades mecánicas lo hace apropiado para estructuras artísticas, como se puede ver en la *Figura 2.9* y en la *Figura 2.10*.



*Figura 2.9 – Arco Gateway en San Luis (Misuri) [14]*



*Figura 2.10 – Vestíbulo de Caixa Forum en Madrid [15]*

## 2.2. Mecanizado

El mecanizado es un proceso de fabricación de piezas. Se trata de un conjunto de operaciones que permiten obtener una pieza con una forma y dimensiones deseadas. Para ello se parte de una pieza en bruto, denominada tocho, y se van separando partes del material en forma de viruta por medios mecánicos y con herramientas con filo para así obtener la pieza final. Por esta razón se dice que es un proceso de fabricación por arranque de viruta.

En el arranque de viruta son los filos de las herramientas los que realizan el mecanizado. Los procedimientos de fabricación pueden clasificarse según la forma de corte:

- Procesos de arranque con filos geoméricamente determinados. Los útiles arrancan las virutas con la cuña de sus filos que tienen formas geoméricamente determinadas. Ejemplos de esta forma de corte son el torneado y el fresado.
- Procesos de arranque con filos no determinados. Las finas virutas son arrancadas en estos casos por granos abrasivos que carecen de forma geométrica determinada. El rectificado sirve como ejemplo en este tipo.

Los procesos de mecanizado se desarrollan en la actualidad industrialmente mediante máquinas herramienta, que son un tipo de máquinas que se utilizan para dar forma a piezas en bruto. Los elementos más importantes de este tipo de máquinas son la herramienta de corte y los elementos de sujeción.

En función del movimiento relativo que se da entre la máquina-herramienta y la pieza se clasifican principalmente tres procesos de mecanizado con pérdida de material:

- Torneado. La geometría de la pieza se obtiene mediante la combinación de movimientos de revolución de la pieza y de desplazamiento de la herramienta pudiendo generar piezas con formas cilíndricas y redondeadas. El torneado es el proceso más común en el corte del metal, y puede dividirse en varias aplicaciones básicas: torneado longitudinal, refrentado o perfilado, entre otras. Las operaciones de torneado se llevan a cabo en un torno.



*Figura 2.11 – Torno convencional [16]*

El proceso de mecanizado estudiado en este proyecto será el de torneado, por ser el proceso de fabricación más común.



- Fresado. Se arrancan virutas utilizando una herramienta de forma circular con múltiples filos llamada fresa. El movimiento principal de corte es circular y lo realiza la fresa al girar sobre su propio eje, ya sea vertical u horizontal. Junto al torno, la fresadora es la máquina herramienta más versátil.



*Figura 2.12 – Fresadora [17]*

- Taladrado. El proceso de taladrado se utiliza para realizar en las piezas agujeros pasantes o ciegos que se denominan taladros. Las aplicaciones de estos taladros son múltiples: alojamiento de tornillos, ejes y émbolos, dar paso a fluidos, etc. La máquina herramienta que se utiliza para taladrar es la taladradora.



*Figura 2.13 – Taladradora de banco [18]*

#### 2.2.1. Mecanizado a Alta Velocidad

El concepto de Mecanizado a Alta Velocidad (MAV por sus siglas) tiene su origen en una patente de Carl Salomon. Salomon afirmaba que en el mecanizado existe una velocidad crítica que depende del material a partir de la cual la temperatura de formación de viruta comienza a decrecer. Esta velocidad está entre 5 y 10 veces la usada en el torno convencional. Cabe destacar que según Salomon la disminución es pequeña en fundición y aceros, aunque es muy importante en materiales no ferrosos, como se puede observar en la *Figura 2.14*.

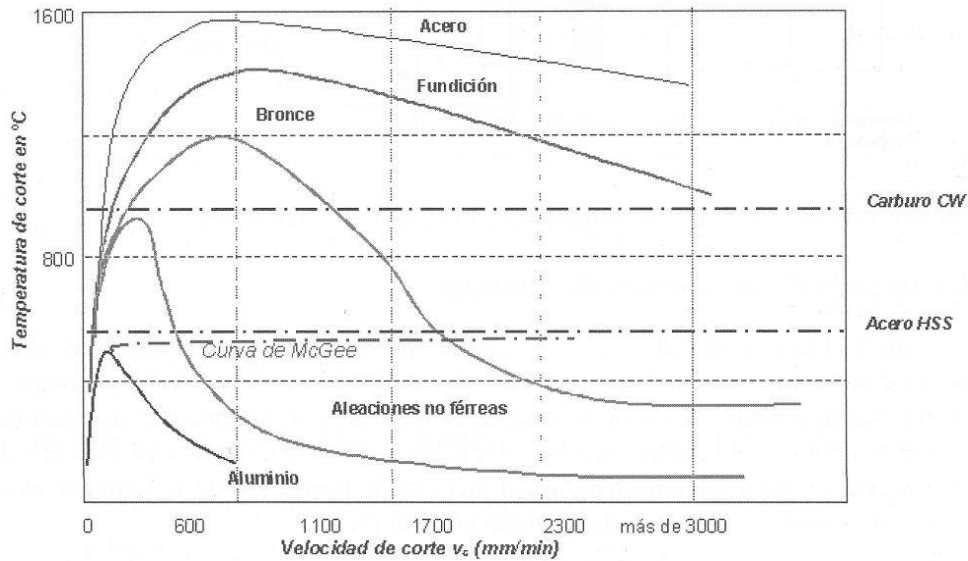


Figura 2.14 – Curvas de Salomon para distintos materiales [19]

Actualmente se sabe que la temperatura y el desgaste siempre crecen, aunque tienden a estabilizarse cuando la velocidad de corte es elevada. La curva de McGee para el aluminio que se aprecia en la *Figura 2.14* se asemeja más a la realidad que la curva de Salomon. Respecto a los demás materiales, es muy difícil comprobar si éstos soportan velocidades tan altas porque normalmente antes de alcanzar estos valores las herramientas se rompen.

Lo que se entiende por alta velocidad se refleja en la *Figura 2.15*. Para alcanzar estas velocidades es necesario disponer de herramientas adecuadas capaces de resistir los efectos de éstas, lo cual es bastante difícil debido a su propia construcción y al mecanismo de accionamiento principal (husillo).

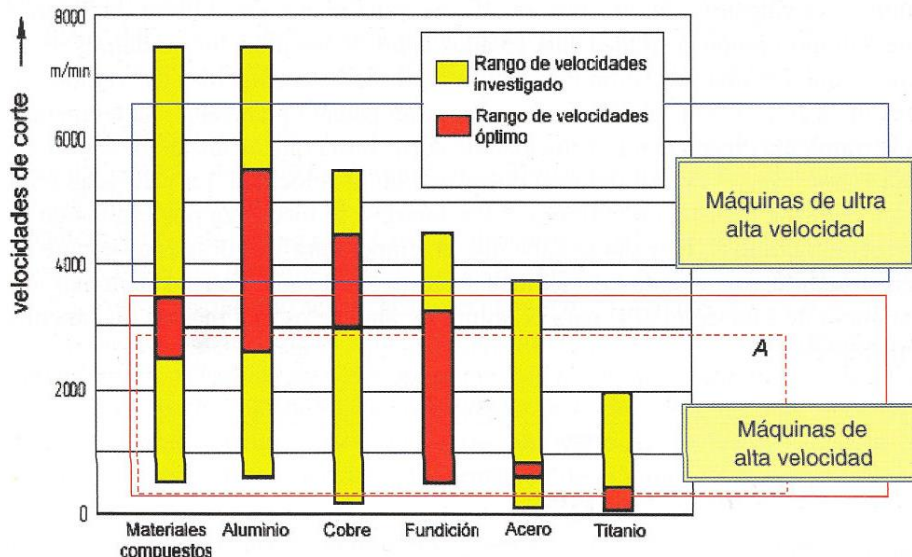


Figura 2.15 – Rango de altas velocidades en el corte en diferentes materiales [19]

Aunque la zona de *ultra alta velocidad* se encuentra en fase de prototipos, es ya una realidad, por lo que se hace necesario más investigación para llevarlo a una fase comercial. Entre otras, las ventajas de un mecanizado a velocidad muy alta son la

## Capítulo II – Estado del arte

obtención de una pieza mucho más precisa, con un mejor acabado y sin rebabas apreciables. También se reducen las fuerzas de corte y la cantidad de calor transmitida a la pieza.

### 2.2.2. Parámetros de corte

Las variables que se controlan en una operación de mecanizado son principalmente tres:

- Velocidad de corte,  $V_c$ . Es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte. El cálculo de las revoluciones a las que debe girar la pieza o la herramienta se hace con este dato, mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [2.1]$$

Donde:

- $V_c$  es la velocidad de corte en  $\left[\frac{m}{min}\right]$ .
- $d$  es el diámetro de la pieza, en torneado, o de la herramienta, en fresado, en  $[mm]$ .
- $n$  es la velocidad de giro de la pieza, en torneado, o de la herramienta, en fresado, en un minuto en  $[rpm]$ .

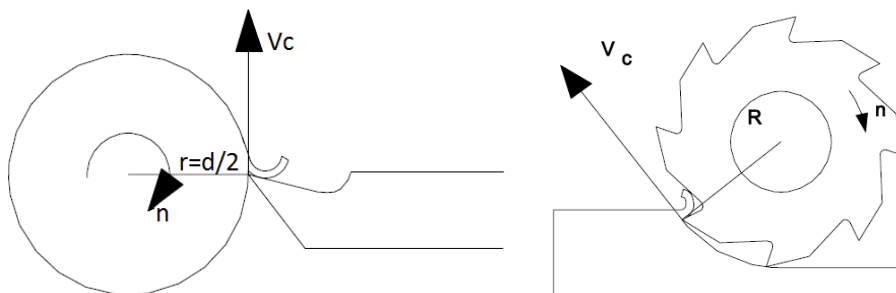


Figura 2.16 – Velocidad de corte en torneado y fresado

- Avance,  $a$ . Es el desplazamiento recorrido por la herramienta en cada revolución o carrera. Conocidos la velocidad de giro y el avance, es posible calcular la velocidad de avance  $V_a$ :

$$V_a = a \cdot n \quad [2.2]$$

Donde:

- $a$  es el avance en  $[mm]$
- $n$  es la velocidad de giro de la pieza, en torneado, o de la herramienta, en fresado, en un minuto en  $[rpm]$ .
- Profundidad de corte,  $p$ . Es la distancia que penetra la herramienta en la pieza.

### 2.2.3. Corte ortogonal y corte oblicuo

Por otro lado, la forma en que se corta el material también se puede clasificar en si el corte es oblicuo u ortogonal. Para diferenciarlos, se define un ángulo de inclinación  $i$ ,



formado por el filo de corte y la dirección perpendicular a la dirección de avance de la herramienta. El corte ortogonal se dará cuando el ángulo  $i$  sea nulo, por lo que el filo de corte quedará perpendicular a la dirección del desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza. En cambio, se dará la condición de corte oblicuo cuando el ángulo  $i$  sea distinto de cero. En la *Figura 2.17* se aprecia el esquema de un corte con herramienta oblicua.

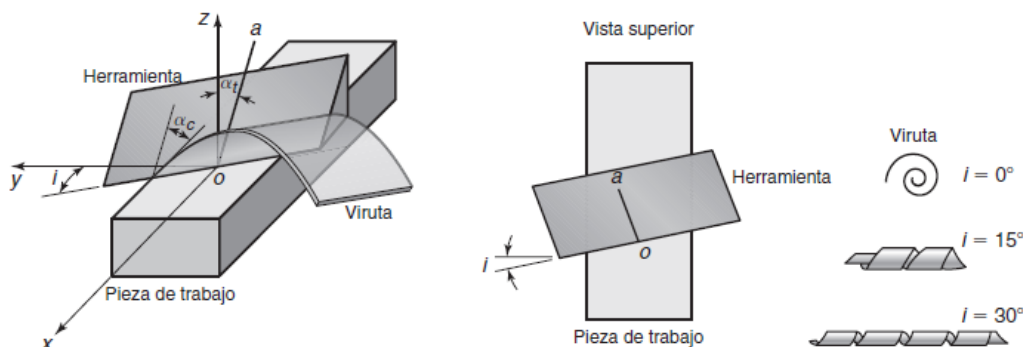


Figura 2.17 – Esquema de corte con herramienta oblicua [4]

Una de las ventajas del mecanizado con corte oblicuo es que la viruta generada, cuya forma es helicoidal, se mueve hacia los lados, alejándose de las zonas de corte y sin obstruirla, como lo haría en el corte ortogonal. La mayoría de las operaciones de mecanizado comprenden formas de herramientas tridimensionales cuyo corte es oblicuo.

Sin embargo, en el corte oblicuo las fuerzas de corte se descomponen en tres componentes en lugar de dos como ocurre en el corte ortogonal. La relación entre las fuerzas depende de la geometría de la herramienta, del ángulo de cizalladura  $\phi$  y del ángulo de inclinación  $i$ . Debido a las dependencias con estos ángulos, el corte oblicuo requiere el estudio espacial de la geometría de las herramientas de corte, teniendo en cuenta que las herramientas en muchas ocasiones cortan con dos filos simultáneamente, y que además los filos pueden ser curvos, siendo la inclinación del éste variable en cada punto de corte. Todo esto dificulta mucho su análisis. En la *Figura 2.18* se aprecia la complejidad del corte oblicuo.

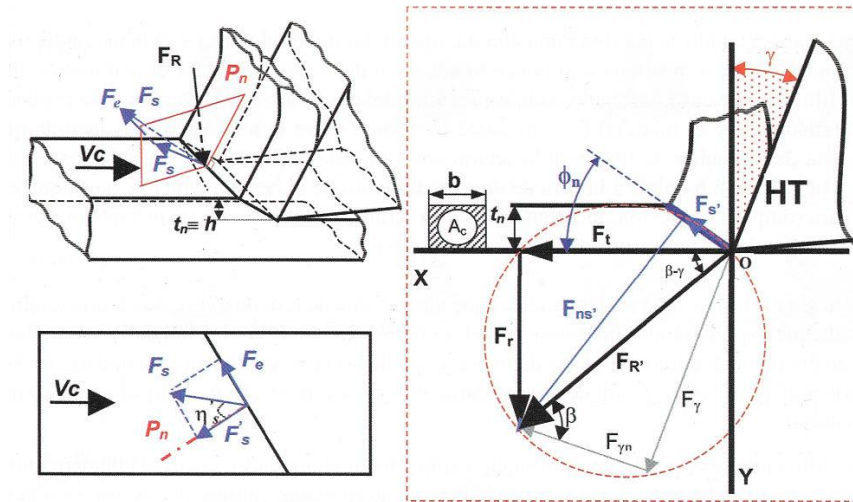


Figura 2.18 – Complejidad geométrica del corte oblicuo [19]

El corte ortogonal es un modelo simplificado del proceso de arranque de viruta que permite calcular los parámetros característicos del corte sin alejarse mucho de la realidad. La complejidad de cálculo se reduce en gran medida, y es el modelo que se utiliza en las simulaciones numéricas, ya que esto supone una reducción en el tiempo de cálculo. Por ello, se va a explicar con más detalle el corte ortogonal en los siguientes subapartados.

### 2.2.3.1. Ángulos

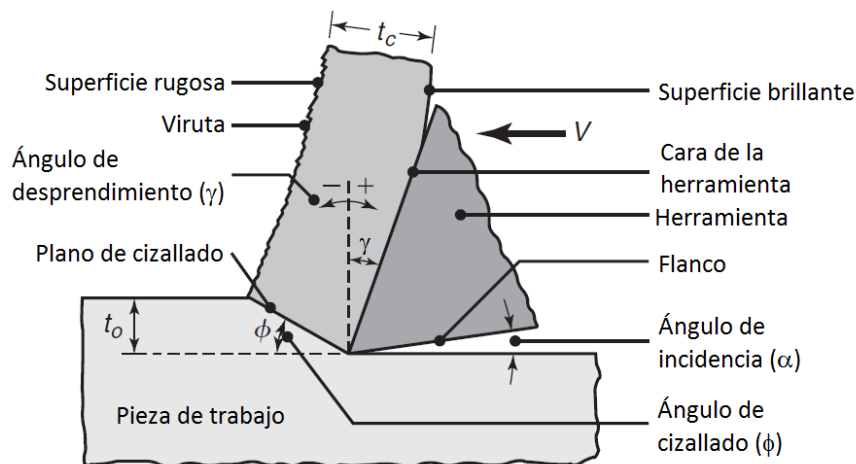


Figura 2.19 – Ángulos en el corte ortogonal [4]

Los elementos más importantes de una herramienta en el corte ortogonal son el filo, la superficie de ataque o desprendimiento y la superficie de incidencia. Los ángulos que definen la posición de estos elementos son:

- El ángulo de incidencia,  $\alpha$ . Está formado por la superficie de incidencia y el plano que contiene al filo y a la velocidad de corte. Un ángulo de incidencia pequeño aumenta el contacto con la pieza que produce un roce excesivo y por lo tanto un desgaste prematuro de la herramienta. Si es demasiado grande, se evita el desgaste prematuro pero se debilita el filo.



- El ángulo de desprendimiento,  $\gamma$ . Está formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo. Si el ángulo de desprendimiento es grande, la herramienta corta mejor produciendo un mejor acabado superficial y un filo muy debilitado. En cambio, si es pequeño se necesitan mayor energía ya que favorece la resistencia de la herramienta.
- El ángulo de filo o herramienta,  $\beta$ . Es el ángulo formado entre la superficie de incidencia y la superficie de desprendimiento.

La elección de estos ángulos queda determinada en función del material de la pieza y de la herramienta.

Otro ángulo de importancia en el corte ortogonal es el ángulo de cizallado ( $\phi$ ). Este ángulo determina la posición del plano de cizallado con respecto al plano que contiene al filo y a la velocidad de corte. Su importancia radica en que por debajo de este plano la pieza de trabajo permanece sin deformaciones, y por encima de él la viruta sale recién formada fluyendo sobre la superficie de desprendimiento.

#### 2.2.3.2. Velocidades

En el corte ortogonal intervienen tres velocidades características: la velocidad de corte ( $V_c$ ), la velocidad de deformación o velocidad de cizallamiento ( $V_s$ ) y la velocidad de salida de la viruta ( $V_v$ ). La primera ya ha sido mencionada en apartados anteriores, por lo que a continuación se define el cálculo para las otras dos velocidades. Para ello, se necesita conocer dos factores: el ángulo de cizallado  $\phi$  y el factor de recalcado  $C_r$ . Estos se calculan a partir de:

$$C_r = \frac{t_c}{t_o} \quad [2.3]$$

$$\tan \phi = \frac{\cos \gamma}{C_r - \sin \gamma} \quad [2.4]$$

Donde:

- $t_c$  es el espesor de la viruta.
- $t_o$  es la profundidad de corte.

Una vez determinados estos factores, y junto a la velocidad de corte, se construyen las expresiones que definen las velocidades descritas anteriormente:

$$V_v = V_c \frac{\sin \phi}{\sin \left( \gamma + \frac{\pi}{2} + \phi \right)} \quad [2.5]$$



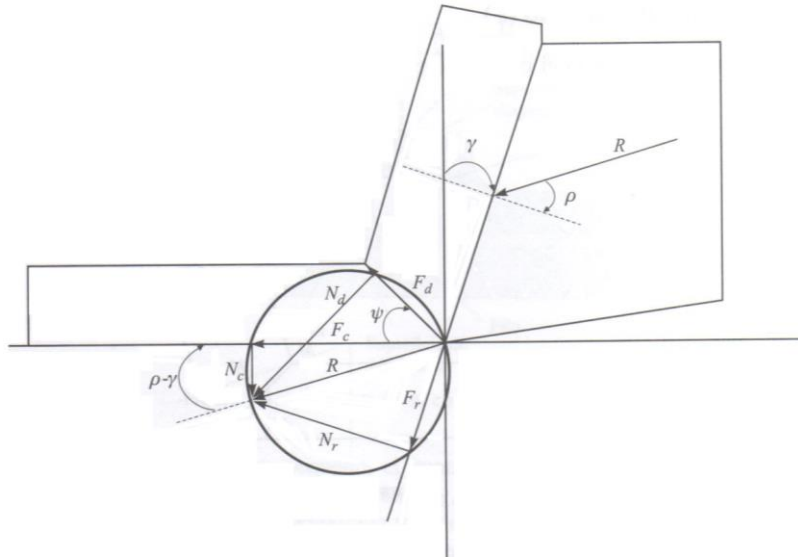
$$V_s = V_c \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)}{\sin\left(\gamma + \frac{\pi}{2} + \phi\right)} \quad [2.6]$$

### 2.2.3.3. Fuerzas

El cálculo de las fuerzas en el mecanizado es de gran importancia ya que permite estimar la potencia que se requerirá en el corte.

Las fuerzas de reacción del material que se mecaniza actúan en una zona tanto más alejada del filo cuanto menor sea el ángulo de desprendimiento. El ángulo  $\rho$  con el que actúa la fuerza resultante es a priori desconocido, pero se puede proyectar sobre unas direcciones como las de la *Figura 2.20*. Así, se tienen:

- Fuerza de corte,  $F_c$ .
- Fuerza de deslizamiento,  $F_d$ .
- Fuerza de rozamiento entre la viruta y la herramienta,  $F_r$ .



*Figura 2.20 – Fuerzas en el corte ortogonal [20]*

A partir de la *Figura 2.20* y vectorialmente, se obtiene:

$$R = F_c + N_c = F_d + N_d = F_r + N_r \quad [2.7]$$

Donde:

$$F_c = R \cos(\rho - \gamma) \quad [2.8]$$

$$N_c = R \sin(\rho - \gamma) \quad [2.9]$$

$$F_d = R \cos(\phi + \rho - \gamma) \quad [2.10]$$

$$N_d = R \sin(\phi + \rho - \gamma) \quad [2.11]$$

$$F_r = R \sin \rho \quad [2.12]$$

$$N_r = R \cos \rho \quad [2.13]$$

De las expresiones de  $F_r$  y  $N_r$  se obtiene el coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta:

$$\mu = \frac{F_r}{N_r} = \frac{\sin \rho}{\cos \rho} = \tan \rho \quad [2.14]$$

#### 2.2.4. Viruta

La morfología de la viruta es un aspecto muy importante en las operaciones de mecanizado. Permite dar una idea acerca de si el proceso de corte se está realizando de manera óptima, ya que las formas que adopta ésta son bastante características.

La viruta tiene dos superficies: una que ha estado en contacto con la cara de ataque de la herramienta y posee una apariencia brillante y pulida, provocada por el rozamiento conforme se desplaza por la longitud de contacto con la herramienta; la otra superficie es la original de la pieza de trabajo, y su apariencia es rugosa y mellada debida al propio proceso de corte. A continuación se citan los principales tipos de viruta que pueden existir en las operaciones de mecanizado:

- Viruta continua. Se forman con materiales dúctiles, a altas velocidades de corte o a ángulos elevados de desprendimiento. La deformación del material ocurre a lo largo de una estrecha zona de cizallamiento llamada zona primaria de cizallamiento. Las virutas continuas pueden desarrollar también una zona secundaria debido a la elevada fricción entre la herramienta y ésta.

Aunque por lo general producen un buen acabado superficial, las virutas continuas no son siempre deseables, ya que tienden a atorarse alrededor de los portaherramientas, los soportes y la pieza de trabajo, lo que obliga a que a veces se tenga que detener la operación para limpiar los residuos. Este problema se puede solucionar con un rompevirutas o cambiando los parámetros de corte.

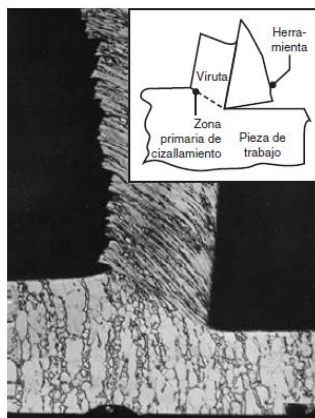


Figura 2.21 – Viruta continua con zona primaria de cizallamiento [4]

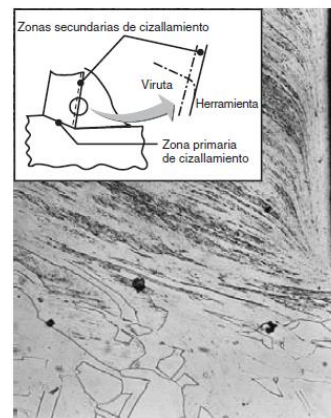
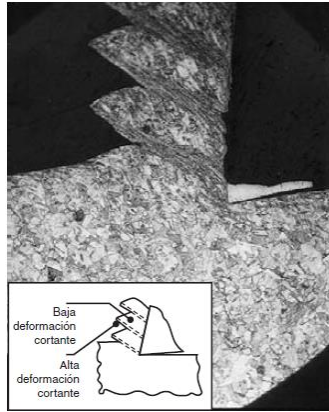


Figura 2.22 – Viruta continua con zonas primaria y secundaria de cizallamiento [4]

Capítulo II – Estado del arte

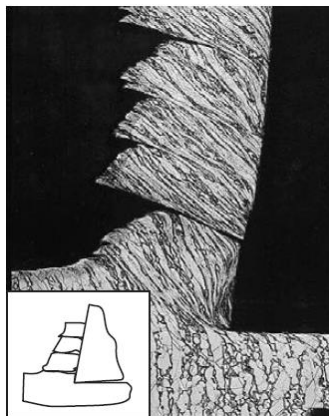
- Viruta segmentada. Son semicontinuas, con grandes zonas de baja deformación cortante y pequeñas zonas de alta deformación cortante. Este comportamiento se muestra en metales con baja conductividad térmica y resistencia, que disminuyen en forma abrupta con la temperatura, más notablemente en el titanio.



*Figura 2.23 – Viruta segmentada [4]*

- Viruta discontinua. Consiste en segmentos que pueden estar firmemente sujetos uno a otro, o muy sueltos. Se da en materiales frágiles ya que no tienen la capacidad de soportar la deformación cortante. También se da a velocidades de corte muy bajas.

La formación de esta viruta ocasiona que la fuerza varíe de manera continua durante el corte. Por tanto, si el portaherramientas, los dispositivos de sujeción y la máquina herramienta no son suficientemente rígidos pueden producirse vibraciones y traqueteos, lo que puede causar un desgaste prematuro en la herramienta de corte.



*Figura 2.24 – Viruta discontinua [4]*

### 2.3. Modelo de comportamiento: Johnson–Cook

El modelado del comportamiento del material es de gran importancia ya que de él depende la veracidad de los resultados en una simulación. Las ecuaciones constitutivas describen la resistencia del material durante su comportamiento elástico y plástico.

El proceso de mecanizado somete la pieza a elevados niveles de deformación, velocidades de deformación y generación de calor. Esto justifica la necesidad de un modelo constitutivo que sea válido para valores tan grandes.

El modelo de Jonhson–Cook es el modelo constitutivo más utilizado para realizar simulaciones numéricas de mecanizado. Es un modelo termo-vico-plástico, que tiene en cuenta las condiciones de elasticidad, plasticidad y temperatura, de manera que en su ecuación aparecen tres términos claramente diferenciados haciendo referencia a estas condiciones. La ecuación es la siguiente:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right) \quad [2.15]$$

Siendo  $\varepsilon$  la deformación plástica,  $\dot{\varepsilon}$  la velocidad de deformación plástica y  $\dot{\varepsilon}_0$  la velocidad de deformación plástica de referencia.  $T_f$  es la temperatura de fusión del material y  $T_0$  la temperatura ambiente.

Las constantes del modelo son  $A, B, C, m$  y  $n$ . Cada material tiene unas constantes diferentes, y éstas tienen que ser determinadas experimentalmente.

- $A$  representa el límite elástico a temperatura ambiente en condiciones de baja velocidad de deformación.
- $B$  y  $n$  indican el efecto de endurecimiento por deformación del material.
- $C$  y  $m$  representan la sensibilidad del material a la velocidad de deformación y a la temperatura, respectivamente.

En el modelo de Jonhson–Cook existen tres términos bien diferenciados delimitados en la Ecuación [ 2.15 ]. El primero es la ley de endurecimiento por deformación. Los otros dos, en función de la velocidad de deformación y de la temperatura, incrementan o disminuyen los valores de las tensiones, respectivamente, como se puede observar en la Figura 2.25.

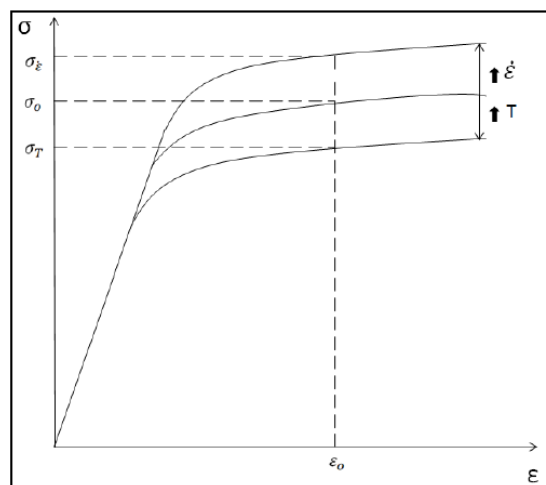


Figura 2.25 – Influencia del aumento de la temperatura y la velocidad de deformación en la tensión

## 2.4. Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos, o por sus siglas MEF, es un método numérico de resolución de problemas relacionados con la mecánica de sólidos cuya utilidad práctica ha hecho que sea muy importante en la actualidad. El MEF permite resolver casos que hasta hace poco eran prácticamente imposibles de solventar por métodos matemáticos tradicionales, lo que obligaba a realizar ensayos sobre prototipos reales con el consecuente elevado coste económico.

Aunque el MEF permite realizar un modelo de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo, no deja de ser un método aproximado de cálculo. No proporciona la solución exacta a un problema dado; en realidad, permite obtener una solución aproximada que, con un juicio ingenieril, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico. Por tanto, los prototipos siguen siendo necesarios para obtener unos resultados totalmente fiables, pero en un número mucho menor que antes.

Por otro lado, el MEF como formulación matemática es relativamente nuevo. Aunque su estructura básica era conocida desde aproximadamente 1950, gracias al rápido declive en el coste de los ordenadores y el gran incremento en la potencia de cálculo el MEF ha sufrido un enorme desarrollo en los últimos años. Precisamente, han sido estos avances informáticos los que han puesto a disposición de los usuarios una gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos aplicando el método de elementos finitos.

La idea básica del MEF consiste en lo siguiente: dado un sólido sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras, se divide éste en pequeñas partes (proceso denominado discretización), denominadas comúnmente elementos, interconectados entre sí a través de unos puntos, denominados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sólido también regirán el comportamiento del elemento. De esta manera se pasa de tener un sólido continuo con infinitos grados de libertad a un sólido discretizado con un número determinado de grados de libertad.

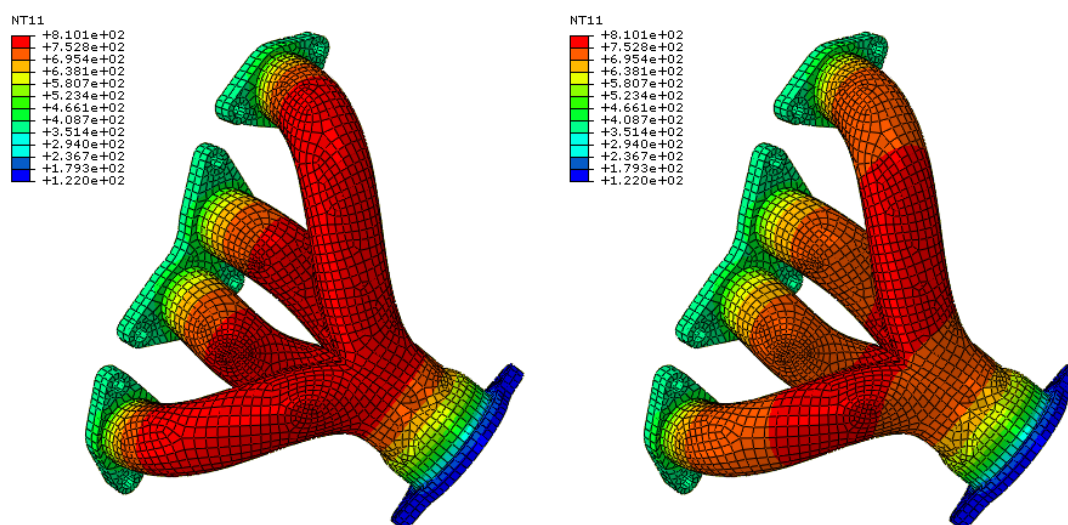


Figura 2.26 - Ejemplo de aplicación de MEF en un colector de admisión [21]



En este proyecto se ha utilizado el programa Abaqus, que aplica el método de elementos finitos para la resolución del problema planteado. Abaqus está compuesto por varios productos: Abaqus/CAE (siendo CAE el acrónimo de "Complete Abaqus Environment"), Abaqus/CFD (acrónimo de "Computational Fluid Dynamics"), Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit. En concreto, se ha utilizado este último ya que Abaqus/Explicit está particularmente bien adaptado para simular eventos dinámicos transitorios breves, como es el caso que ocupa este proyecto.



# Capítulo III

## 3. Estudio experimental

A lo largo de este capítulo se muestra una recopilación de información sobre datos experimentales de corte ortogonal con acero 304/304L. El objetivo es conocer qué se ha estudiado anteriormente a este proyecto, y realizar una comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos por las simulaciones, y así proceder a su validación.

### 3.1. Corte ortogonal experimental de acero 304/304L

Como se comentó anteriormente, los aceros inoxidables son difíciles de maquinar. En concreto, los aceros austeníticos, como el 304/304L, presentan problemas debido a la gran resistencia que éstos poseen, lo que induce traqueteos en la máquina herramienta. Sin embargo, existen ciertos aceros austeníticos a los que les ha añadido aleantes que favorecen su maquinabilidad, como el azufre. Esto favorece la preferencia de dichos aceros para productos que en su fabricación requieran ser mecanizados.

Por otro lado, el acero 304/304L utilizado en los ensayos experimentales no ofrece las mismas propiedades en todos los artículos, debido principalmente a las distintas cantidades de aleantes que lleva en su composición. Estas diferencias supondrán valores distintos de un parámetro determinado para las mismas condiciones de corte.

Como se dijo en apartados anteriores, aunque la mayoría de los procesos de mecanizado se realizan en corte oblicuo, el caso que se estudia en este proyecto se realiza corte ortogonal. Como ya se explicó, el corte ortogonal resulta más simple en cuestión de cálculos que el corte oblicuo, aunque se obtienen resultados igualmente válidos. Por ello, la mayoría de los artículos encontrados son realizados en corte ortogonal.

### 3.2. Presiones específicas de corte y avance

En el mecanizado es el filo de la herramienta lo que corta el material de trabajo. Durante este proceso de corte se producen unas fuerzas de reacción en la herramienta como consecuencia del corte, y estas fuerzas pueden ser medidas mediante dinamómetros en las direcciones en las que se desea conocer dichas fuerzas. Como los ca a los que se refieren los artículos tratan el corte ortogonal, sólo habrá dos componentes de fuerza distintas de cero: la fuerza de corte  $F_c$  y la fuerza de avance  $F_a$ .

En la literatura, generalmente, se pueden observar que las fuerzas de corte y de avance están entre un amplio rango de valores, lo cual quiere decir que existen diversos factores que influyen en el valor de dichas fuerzas. Estos factores son, principalmente, la velocidad





de corte, el avance y la profundidad de corte. Por tanto, atendiendo a los valores de las fuerzas no se podrían comparar los ensayos experimentales realizados en un artículo con los llevados a cabo en otro. Para poder comparar los artículos estos valores deben ser independientes. Escogiendo una velocidad de corte determinada, se puede comparar un artículo con otro dividiendo la fuerza entre el avance y la profundidad de corte, dando lugar a una presión. Entonces, existirán dos presiones distintas correspondientes a las dos fuerzas del corte ortogonal. Éstas se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_c = \frac{F_c}{a \cdot p} \quad [ 3.1 ]$$

$$P_a = \frac{F_a}{a \cdot p} \quad [ 3.2 ]$$

Siendo  $P_c$  y  $P_a$  la presión específica de corte y la presión específica de avance, respectivamente.

A partir de los datos de experimentos encontrados en los artículos, se han representado las presiones específicas de corte y las presiones específicas de avance en función de la velocidad de corte en la *Figura 3.1* y en la *Figura 3.2*, respectivamente.

En el proyecto, la referencia a los artículos utilizados se realizará mediante el nombre de los autores correspondientes. Por tanto, se tienen cinco artículos: Swapnagandha et al. [22], Grzesik y Nieslony [23], Bakkal et al. [24], Kumar et al. [25] y Kulkarni et al. [26]. En ciertos artículos se han realizado ensayos con diferentes velocidades de corte, avances y profundidades de corte. Para representarlos se han aislado los ensayos con diferentes avances y profundidades de corte, mostrándose así en la leyenda con la adición de una letra (a, b, c y d) o un número (1, 2 y 3) a la referencia del artículo correspondiente. En la *Tabla 3.1* y en la *Tabla 3.2* se da más información acerca de los experimentos.





## Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidables

### Capítulo III – Estudio experimental

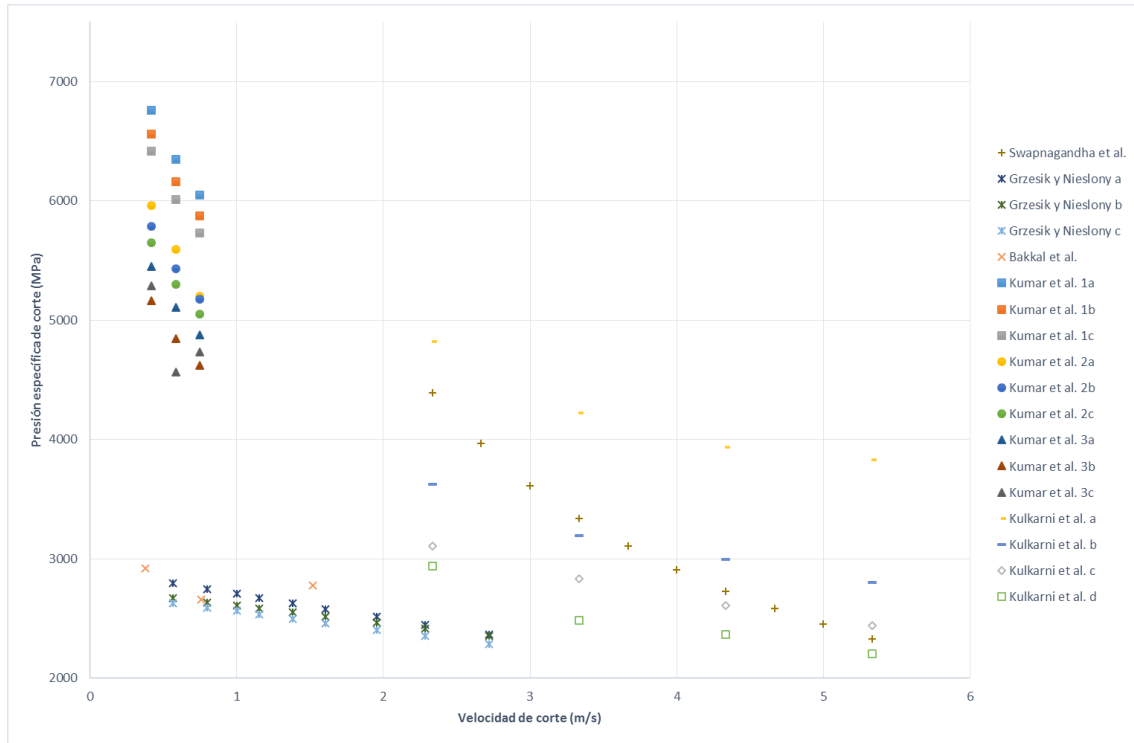


Figura 3.1 – Comparación de presiones específicas de corte experimentales obtenidas en distintos ensayos en función de la velocidad

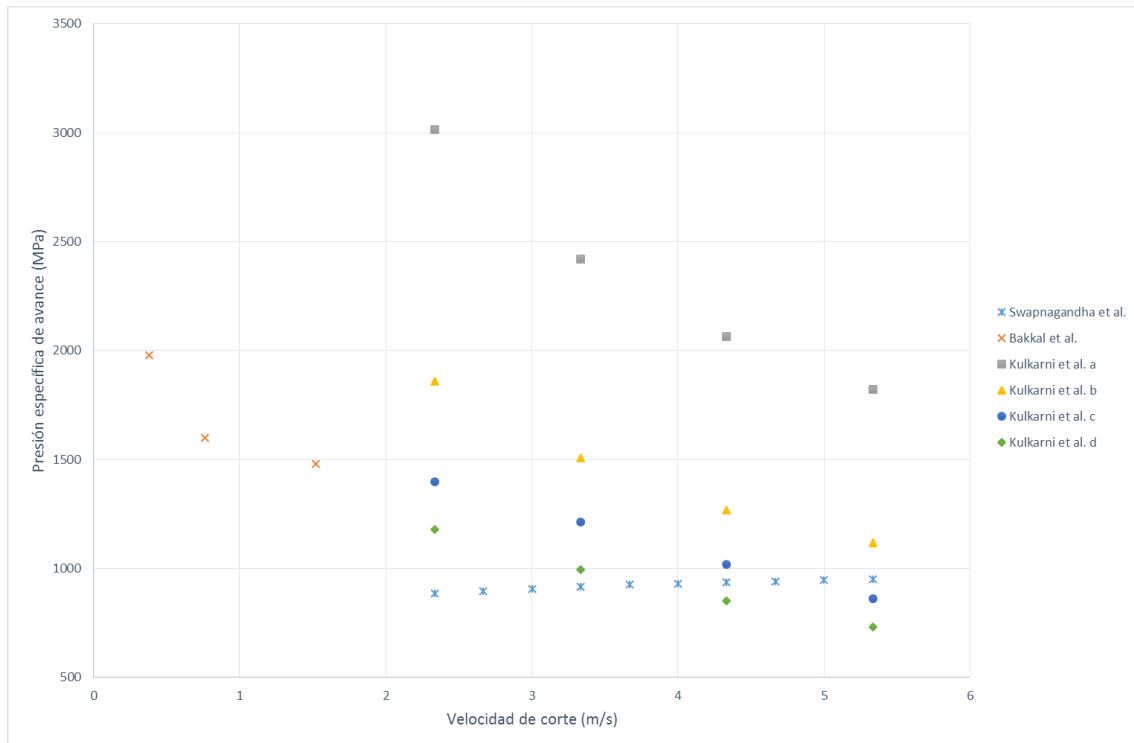


Figura 3.2 – Comparación de presiones específicas de avance experimentales obtenidas en distintos ensayos en función de la velocidad



Capítulo III – Estudio experimental

En ambas gráficas se puede observar claramente que las presiones específicas disminuyen cuanto mayor sea la velocidad de corte. Aunque no se disponen de datos de presiones específicas a mayores velocidades de corte, se aprecia vagamente que la caída de dichas presiones con el aumento de la velocidad se va suavizando, pudiendo predecirse que seguirá suavizándose hasta alcanzar un valor constante.

A bajas velocidades las presiones específicas, y por tanto las fuerzas, son mayores. Esto se debe a que la viruta permanece durante más tiempo en la superficie de desprendimiento de la herramienta, lo que incrementa la longitud de contacto herramienta-viruta. En consecuencia, aumenta la fricción entre la herramienta y la viruta, y resultan fuerzas más altas. Por otro lado, cuando se mecaniza a velocidades más altas la generación de calor también resulta mayor y provoca un ablandamiento del material en la zona de corte, lo que ayuda a quitar material más fácilmente, ya que se necesitan fuerzas menores para cortar.

Además de los parámetros de corte, hay otras características de los ensayos experimentales que influyen en los resultados de éstos. Por ello, a modo de resumen se dan en la *Tabla 3.1* y en la *Tabla 3.2* las condiciones de corte ensayadas en cada experimento.

*Tabla 3.1 – Condiciones de corte de los experimentos 1*

Artículo	Rango de velocidades de corte ensayadas ( <i>m/s</i> )	Avance ( <i>mm</i> )	Profundidad de corte ( <i>mm</i> )
Swapnagandha et al. [22]	2,3 – 5,3	0,17	0,75
Grzesik y Nieslony a [23]	0,6 – 2,7	0,16	2
Grzesik y Nieslony b [23]	0,6 – 2,7	0,16	2
Grzesik y Nieslony c [23]	0,6 – 2,7	0,16	2
Bakkal et al. [24]	0,38 – 1,52	0,05	0,5
Kumar et al. 1a [25]	0,4 – 0,8	0,1	1
Kumar et al. 1b [25]	0,4 – 0,8	0,1	1,25
Kumar et al. 1c [25]	0,4 – 0,8	0,1	1,5
Kumar et al. 2a [25]	0,4 – 0,8	0,15	1
Kumar et al. 2b [25]	0,4 – 0,8	0,15	1,25
Kumar et al. 2c [25]	0,4 – 0,8	0,15	1,5
Kumar et al. 3a [25]	0,4 – 0,8	0,2	1
Kumar et al. 3b [25]	0,4 – 0,8	0,2	1,25
Kumar et al. 3c [25]	0,4 – 0,8	0,2	1,5
Kulkarni et al. a [26]	2,3 – 5,3	0,08	1
Kulkarni et al. b [26]	2,3 – 5,3	0,14	1
Kulkarni et al. c [26]	2,3 – 5,3	0,2	1
Kulkarni et al. d [26]	2,3 – 5,3	0,26	1



Tabla 3.2 – Condiciones de corte de los experimentos 2

Artículo	Ángulo de incidencia (°)	Ángulo de desprendimiento (°)	Recubrimiento de herramienta
Swapnagandha et al. [22]	—	—	<i>AlCrN/TiAlN</i>
Grzesik y Nieslony a [23]	0	—	Sin recubrimiento
Grzesik y Nieslony b [23]	0	—	<i>TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN</i>
Grzesik y Nieslony c [23]	0	—	<i>TiC/Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN</i>
Bakkal et al. [24]	—	15	<i>TiB<sub>2</sub></i>
Kumar et al. 1a [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 1b [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 1c [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 2a [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 2b [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 2c [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 3a [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 3b [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kumar et al. 3c [25]	—	—	Sin recubrimiento
Kulkarni et al. a [26]	—	—	<i>AlTiCrN</i>
Kulkarni et al. b [26]	—	—	<i>AlTiCrN</i>
Kulkarni et al. c [26]	—	—	<i>AlTiCrN</i>
Kulkarni et al. d [26]	—	—	<i>AlTiCrN</i>

### 3.3. Espesor de viruta

El espesor de viruta tiene una dependencia muy fuerte del avance. Esto significa que el espesor puede variar en gran medida, y por ello se va a proceder de la misma manera que para comparar las fuerzas, es decir, utilizando una fórmula que elimine esta dependencia:

$$T_c = \frac{t_c}{a} \quad [3.3]$$

Siendo  $T_c$  la razón entre el espesor de viruta  $t_c$  y el avance  $a$ , y será el parámetro que se comparará entre distintos experimentos.

En la *Figura 3.3* se han representado los valores de  $T_c$  en función de la velocidad para los distintos experimentos. Los resultados corresponden a los artículos de Korkut et al. [27] y Kulkarni et al. [26]. Se puede apreciar que los valores de espesor de viruta presentan la misma tendencia que la de las fuerzas de corte y de avance, es decir, disminuyen al incrementar la velocidad de corte, suavizando su caída.

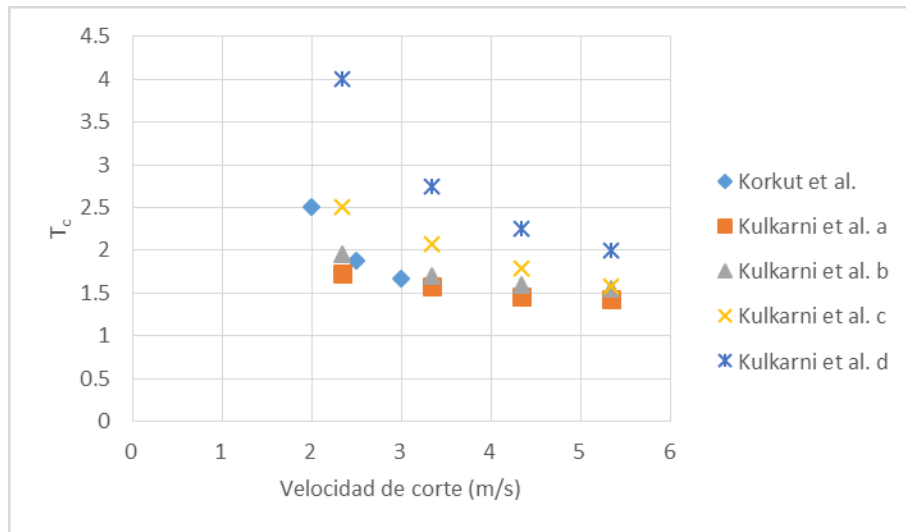


Figura 3.3 – Medidas experimentales de espesor de viruta en función de la velocidad de corte

### 3.4. Longitud de contacto

El artículo correspondiente a Grzesik y Nieslony [23] es el único donde se han encontrado datos experimentales de longitud de contacto a velocidades de corte comparables con las simuladas en este proyecto. Se han representado en la *Figura 3.4*. Al igual que para las presiones de corte y avance y espesor de viruta, la longitud de contacto presenta la misma tendencia de caída que se va suavizando conforme aumenta la velocidad de corte.

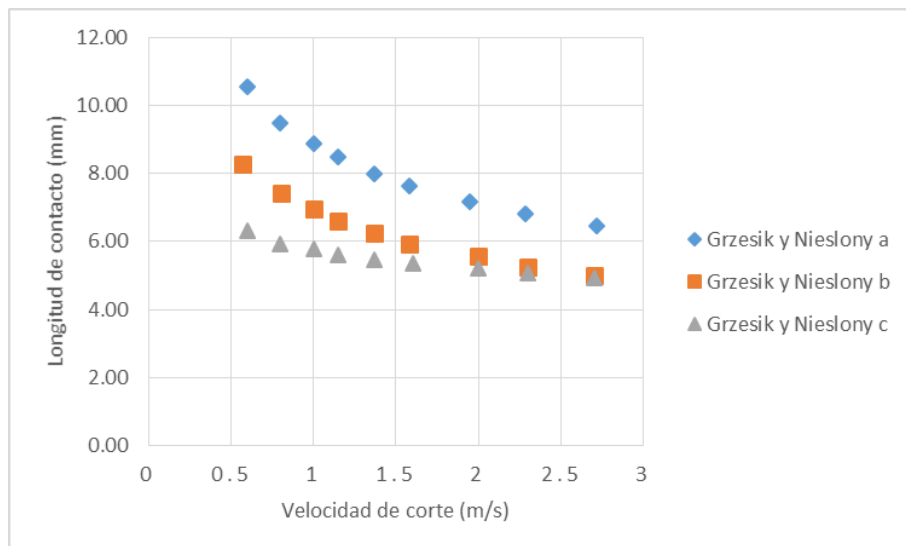


Figura 3.4 – Medidas experimentales de longitud de contacto en función de la velocidad de corte



# Capítulo IV

## 4. Modelo numérico

El cuarto capítulo trata de definir el modelo numérico utilizado para las simulaciones en *Abaqus/Explicit*. También se especifican los parámetros de entrada para dichas simulaciones, así como las constantes de la ecuación constitutiva que rige el comportamiento del material.

### 4.1. Características del modelo

Para llevar a cabo este proyecto se ha elaborado un modelo de deformación plana, es decir, un modelo bidimensional, a partir del código comercial *Abaqus/Explicit*, utilizando formulación lagrangiana.

El modelo se ha desarrollado teniendo en cuenta las condiciones en las que se encuentra: corte ortogonal en un proceso de mecanizado. Por ello se han distinguido dos elementos, el material de trabajo y la herramienta. Como en la realidad, este último se ha supuesto muy rígido para que sea capaz de aguantar los esfuerzos que sufre durante el mecanizado.

Cabe destacar que el desarrollo del modelo no forma parte del contenido de este proyecto ya que conlleva un largo y minucioso trabajo y por ello ha sido facilitado de antemano. A pesar de esto, es de interés destacar ciertos contenidos básicos del mismo, cuya variación da lugar a los distintos archivos de entrada de *Abaqus/Explicit*.

#### 4.1.1. Mallado

El material de trabajo se ha dividido en tres zonas diferenciadas:

- La zona A forma parte de la viruta sin cortar, cuyo espesor es de  $0,1\text{ mm}$  y corresponde al avance.
- La zona B está formada por el material de la pieza que no se corta, y su límite superior corresponde con la superficie mecanizada una vez acabado el proceso de corte. Tiene un espesor de  $0,098\text{ mm}$ .
- La zona C es una interfase entre la viruta y la zona mecanizada, es decir, entre la zona A y la zona B. Tiene un espesor de  $2\text{ }\mu\text{m}$ .

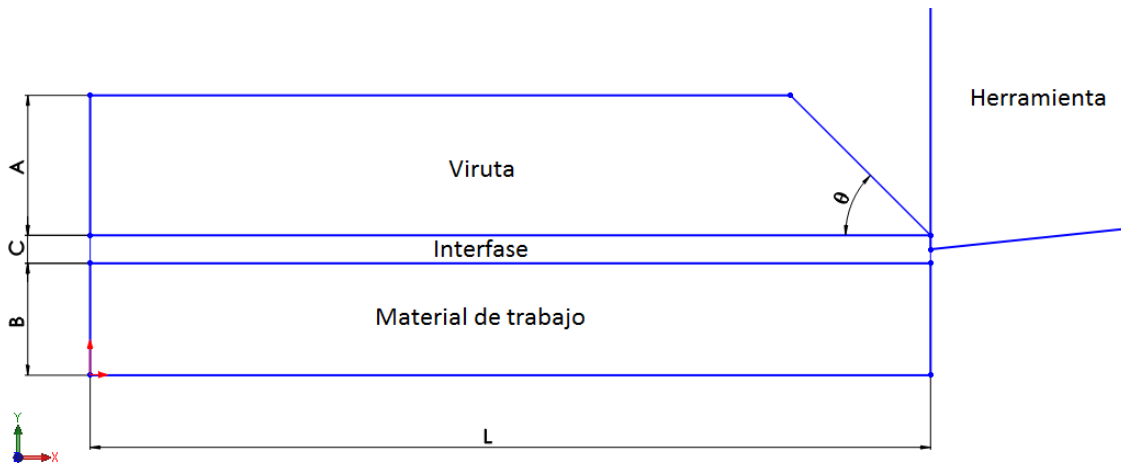


Figura 4.1 – Esquema del modelo numérico

La discretización del modelo se ha llevado a cabo con una malla estructurada con elementos CPE4RT, siglas que determinan:

- C: elemento cuadrado.
- PE: deformación plana.
- 4: cada elemento tiene cuatro nodos.
- R: tiene una interpolación en el centro del elemento.
- T: utiliza la temperatura como variable.

El material de trabajo se ha mallado con elementos de distinta forma y tamaño en función de las zonas. A continuación se describen los elementos correspondientes a cada zona:

- La zona A ha sido mallada con elementos que forman un ángulo  $\theta = 45^\circ$  de inclinación con la horizontal, y mide  $5 \mu m$  en su base.
- La zona B está mallada con cuadrados regulares de lado  $2 \mu m$ .
- La zona C está mallada con elementos en forma de rectángulo, cuyas dimensiones son de  $5 \mu m$  de base y  $1 \mu m$  de altura.

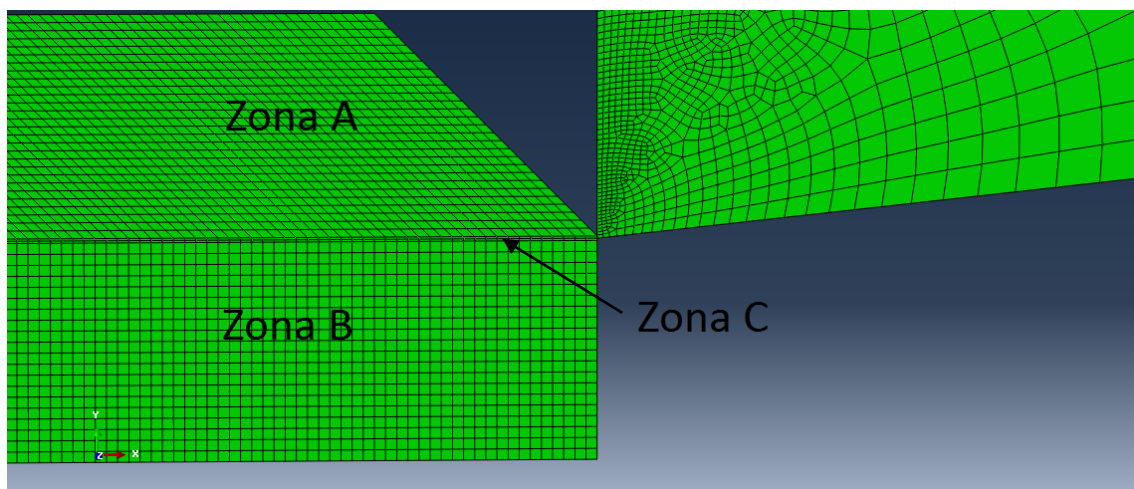


Figura 4.2 – Mallado del modelo numérico

## Capítulo IV – Modelo numérico

La razón por la que la zona C es tan pequeña en comparación con las zonas A y B es que en la realidad no existe, pero se necesita especificar en *Abaqus/Explicit* para definir de forma precisa el criterio de rotura. Sin embargo, de la misma manera, el material puede romper por las zonas A y B, por lo que también se ha definido el criterio de rotura en éstas. Este criterio impone que dos elementos se separan en sus nodos si se alcanza un determinado valor de deformación crítica  $\varepsilon_{crit}$ . Dependiendo de la zona el valor de esta deformación crítica varía, siendo dicho valor más importante en la zona C. En este caso, la deformación crítica está definida para un valor de 3 en la zona de la interfase. El criterio de rotura permite la simulación de corte ortogonal evitando distorsiones excesivas de la malla que provocarían la detención del cálculo.

### 4.1.2. Parámetros geométricos

Las simulaciones numéricas realizadas durante este proyecto se han llevado a cabo mediante corte ortogonal. En la *Tabla 4.1* se dan los parámetros geométricos presentes en este modelo:

Tabla 4.1 – Parámetros geométricos del modelo

Ángulo de desprendimiento, $\gamma$	0°
Ángulo de incidencia, $\alpha$	6°
Avance, $a$ (mm)	0,1
Profundidad, $p$ (mm)	1

### 4.1.3. Condiciones de contorno y parámetros de corte

En la *Figura 4.3* se da un esquema del modelo con las condiciones de contorno que se han utilizado en las simulaciones. En la pieza a mecanizar se ha restringido tanto el movimiento en dirección  $x$  como el movimiento en dirección  $y$ , y las reacciones en dirección  $x$  son nulas. A la zona de la viruta no se le han restringido los movimientos por lo que se puede mover libremente. A la herramienta se le asigna una velocidad  $V_c$  en dirección  $x$  variable.

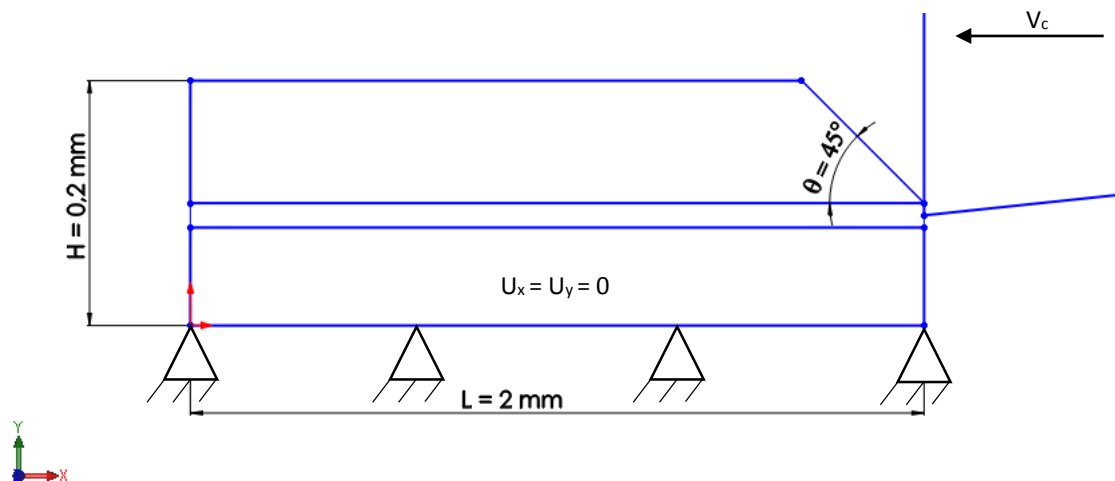


Figura 4.3 – Condiciones de contorno del modelo



En cuanto a los parámetros de corte, algunos han permanecido constantes para todas las simulaciones mientras que otros se han ido variando para observar el efecto que tenían sobre las fuerzas de corte:

- Velocidad de corte,  $V_c$ . Se ha ido variando, desde velocidades de mecanizado bajas hasta velocidades que se encuentran dentro del rango de mecanizado de alta velocidad. En la mayoría de las simulaciones se han asignado valores de  $2 \text{ m/s}$ ,  $4 \text{ m/s}$ ,  $6 \text{ m/s}$ ,  $10 \text{ m/s}$ ,  $20 \text{ m/s}$  y  $25 \text{ m/s}$ , aunque en ciertas simulaciones ha sido necesario también asignar valores de  $2,5 \text{ m/s}$ ,  $3 \text{ m/s}$  y  $3,5 \text{ m/s}$ .
- Longitud de mecanizado,  $L_c$ . Para todas las simulaciones se mantuvo fija la longitud de mecanizado, de valor  $L = 2 \text{ mm}$ .
- Tiempo de corte,  $t_c$ . Este valor depende de la velocidad con la que se realice la simulación y de la distancia que se mecanice. En este caso, la longitud de mecanizado permanece constante, por lo que el tiempo de corte varía según la siguiente ecuación:

$$t_c(\text{ms}) = \frac{L_c}{V_c} = \frac{2 \text{ mm}}{V_c \text{ mm/ms}} \quad [4.1]$$

- Fricción. El valor de entrada de la fricción en el contacto herramienta-viruta permanece constante para todos los casos y de valor  $\mu = 0,8$ .

## 4.2. Características del material

### 4.2.1. Propiedades

El material a mecanizar en las simulaciones es el acero 304/304L. En la *Tabla 4.2* se muestran las propiedades introducidas en *Abaqus/Explicit* para el material de trabajo y para la herramienta. La alta rigidez del material de la herramienta queda patente por el alto módulo de elasticidad.

*Tabla 4.2 – Propiedades del material y de las herramientas introducidas en Abaqus/Explicit*

Propiedad	Material	Herramienta
Conductividad térmica ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )	16,2	33,5
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	7,9	12,7
Módulo de Elasticidad ( $\text{GPa}$ )	193	500
Coefficiente de Poisson	0,33	0,3
Calor específico ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ )	500	234
Coefficiente de dilatación térmica ( $\text{K}^{-1}$ )	$17,2 \cdot 10^{-6}$	—

### 4.2.2. Parámetros de Johnson–Cook

Como se dijo anteriormente, el comportamiento del material será considerado según la ecuación constitutiva de Johnson–Cook. Los parámetros de esta ecuación son calculados a partir de ensayos experimentales. Se monitorizan los valores de tensión, deformación, velocidad de deformación y temperatura, y posteriormente son analizados para





asemejarlos a la curva de Johnson–Cook, obteniendo así los valores de los parámetros característicos de la ecuación:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$  y  $n$ .

En la *Tabla 4.3* se muestran los valores encontrados en la literatura de los parámetros de Johnson–Cook. Estos parámetros han sido validados y utilizados en los artículos para modelar el material como un acero inoxidable 304/304L.

*Tabla 4.3 – Juegos de parámetros de Johnson–Cook [28], [29] y [30]*

Juego de parámetros	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$C$	$m$	$n$	$T_f$ (K)
1	253,32	685,1	0,097	2,044	0,3128	1698
2	310	1000	0,07	1	0,65	1698
3	344,74	310,26	0,24	1,03	0,3	1698

Como se puede observar, existe un amplio rango de valores para los parámetros de Johnson–Cook. Esto puede deberse en parte a las pequeñas variaciones en composición de los aleantes, así como al método que se usa para la obtención de dichos parámetros.

El juego de parámetros utilizado para las simulaciones numéricas en este proyecto es el  $n^{\circ}$  1. El descarte del juego  $n^{\circ}$  3 se debe a que el artículo correspondiente usa un acero 304/304L con un tratamiento térmico de recocido, obteniéndose así un acero bastante blando, que queda reflejado en el bajo valor del parámetro  $B$ . El juego de parámetros  $n^{\circ}$  2 también queda descartado en esta caso por ser excesivamente duro, lo que se refleja en los parámetros  $B$  y  $n$ . Una dureza intermedia entre estos dos juegos de parámetros la posee el  $n^{\circ}$  1. Queda así justificada la elección del primer juego de parámetros.



# Capítulo V

## 5. Validación y resultados

Las simulaciones descritas a continuación constituyen la parte más importante de este proyecto debido a que es donde se ven reflejados en aplicaciones prácticas los conceptos adquiridos durante el grado.

El quinto capítulo de este proyecto hace mención a la descripción de las simulaciones y a la metodología seguida. Posteriormente se validan los resultados de las simulaciones comparando determinados parámetros con los resultados experimentales encontrados en la literatura. Por último son comentados los resultados correspondientes a los dos estudios realizados en el proyecto, analizando en detalle determinados parámetros importantes en el mecanizado del acero 304/304L.

### 5.1. Descripción de las simulaciones y resultados a analizar

Para realizar las simulaciones se ha partido de un modelo desarrollado en *Abaqus/Explicit* en el que se especifican las condiciones de contorno mencionadas en *4.1.3 Condiciones de contorno y parámetros de corte*. Este modelo fue facilitado al comienzo del proyecto ya que conlleva un largo y minucioso trabajo. A partir del modelo inicial se han ido modificando las siguientes variables:

- Velocidad de corte, y en consecuencia el tiempo de mecanizado.
- Sensibilidad a la temperatura, representado por el parámetro  $m$  de Johnson–Cook.

Por otra parte, las simulaciones se han considerado válidas siempre y cuando hubiese una etapa estable. La viruta que produce el acero 304/304L cuando es mecanizado es continua y larga, y no sufre ningún tipo de segmentación como es el caso de las aleaciones de titanio y, por tanto, las etapas estables se darán cuando las fuerzas de corte y de avance sean aproximadamente constantes. Se descartan las simulaciones cuyas fuerzas no tengan dicha etapa ya que no representan la realidad.

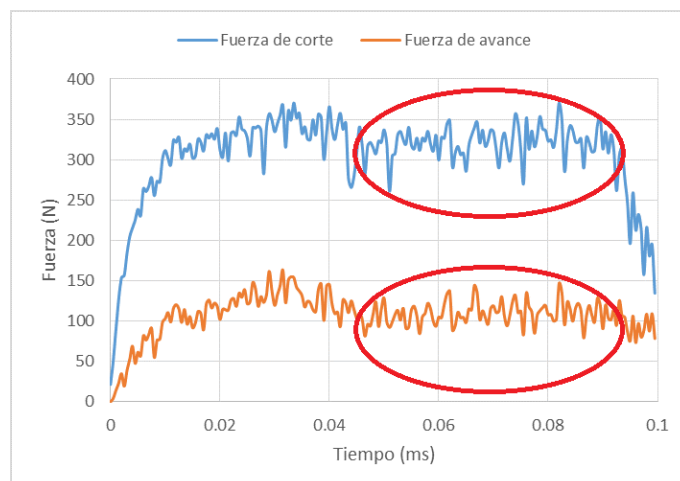


Figura 5.1 – Ejemplo de etapa estable (en rojo)

Cabe destacar que algunas de estas simulaciones han abortado antes de mecanizar la longitud de mecanizado prefijada debido a que existía una elevada distorsión en los resultados y por ello éstos no eran satisfactorios. La mayoría de estas interrupciones se han dado cuando se simulaban velocidades bajas, del orden de  $2 \text{ m/s}$  y  $3 \text{ m/s}$ . Esto no significa que los resultados generados antes del fallo fuesen desechados debido a que igualmente podían presentar etapas estables.

A continuación se procede a describir las características de los dos estudios realizados y los resultados que se han extraído de ellos.

### Estudio de comportamiento en mecanizado del material original

Este estudio trata de simular las condiciones reales de mecanizado, en concreto un proceso de torneado, en un modelo bidimensional, para el acero 304/304L. Las propiedades del material son las de la *Tabla 4.2* y los parámetros de Johnson–Cook corresponden al primer juego de parámetros de la *Tabla 4.3*. Las velocidades empleadas para las simulaciones de este estudio han sido de  $2,5 \text{ m/s}$ ,  $3,5 \text{ m/s}$ ,  $4 \text{ m/s}$ ,  $6 \text{ m/s}$ ,  $10 \text{ m/s}$ ,  $20 \text{ m/s}$  y  $25 \text{ m/s}$ .

### Estudio paramétrico sobre la sensibilidad a la temperatura

Con este estudio se pretende observar la influencia que tiene la sensibilidad a la temperatura en el proceso de mecanizado. La razón por la que se realiza este estudio es que, al observar los juegos de parámetros de Johnson–Cook de la *Tabla 4.3* se aprecia que el parámetro  $m$ , que es el que representa esta sensibilidad a la temperatura, varía mucho de un juego a otro. Esto puede deberse al procedimiento de obtención del parámetro  $m$ , o bien por la composición del acero 304/304L. En cualquier caso, se considera que este parámetro puede influir significativamente en el comportamiento en mecanizado de dicho acero.

Las propiedades del material son las de la *Tabla 4.2* y los parámetros de Johnson–Cook corresponden al primer juego de parámetros de la *Tabla 4.3*, con la excepción del parámetro  $m$ , que cambiará de valor para  $m = 1$  y  $m = 1,5$ . Las velocidades empleadas



para las simulaciones de este estudio han sido de 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 25 m/s.

## Resultados

De los dos estudios anteriores se han extraído los mismos resultados para analizar y comparar con los resultados experimentales:

- Fuerzas de corte y de avance.
- Morfología de la viruta.
- Espesor de viruta.
- Longitud de contacto.
- Ángulo de cizallado.

### 5.2. Validación

Para dar por válido el modelo utilizado en este proyecto se realiza una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente de los ensayos mencionados en el 3. *Estudio experimental* y los resultados obtenidos a partir de las simulaciones.

A pesar de tener una gran variedad de resultados experimentales, no se pueden comparar con estos todos los obtenidos a partir de las simulaciones. Por un lado, esto se debe a que aunque existen resultados experimentales desde una velocidad de aproximadamente 0,3 m/s, las velocidades de corte ensayadas en las simulaciones comienzan a partir de 2 m/s, por lo que estos datos no serán útiles y serán eliminados en la comparación. A su vez, los ensayos realizados numéricamente se han simulado con velocidades de corte muy altas, es decir, en condiciones de mecanizado a alta velocidad. Actualmente no se ha logrado encontrar datos experimentales en dichas condiciones en corte ortogonal, lo que indica que no se podrán comparar estos resultados con la realidad.

Los datos comparados corresponden a las presiones específicas de corte y de avance, en función de la velocidad de corte. Los datos experimentales han sido calculados como se comentó anteriormente en el apartado 3.2 *Presiones específicas de corte y avance*, ya que los resultados que se observan en estos ensayos corresponden a las fuerzas de corte y de avance, es decir, parámetros que no podían ser comparados entre artículos diferentes.

En la *Figura 5.2* se han representado conjuntamente las presiones específicas de corte de los ensayos experimentales junto a las obtenidas en las simulaciones. Se hace lo mismo en la *Figura 5.3*, pero en este caso se han representado las presiones específicas de avance.



*Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidable*  
Capítulo V – Validación y resultados

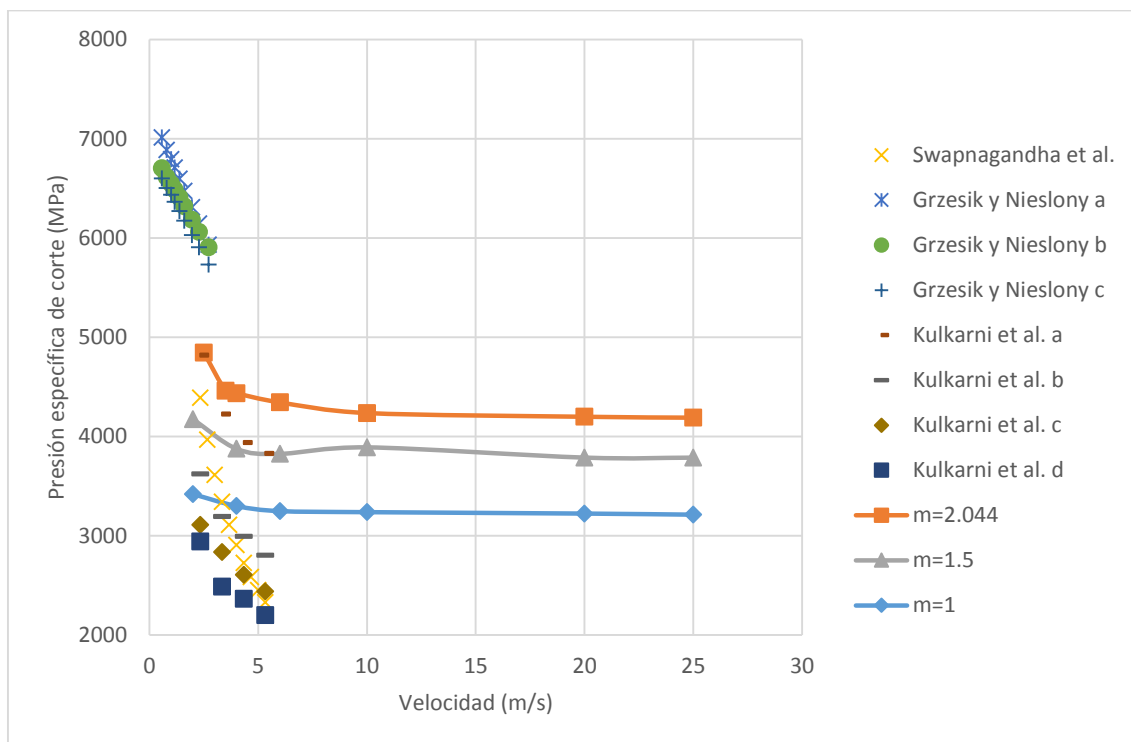


Figura 5.2 – Presiones específicas de corte experimentales y numéricas

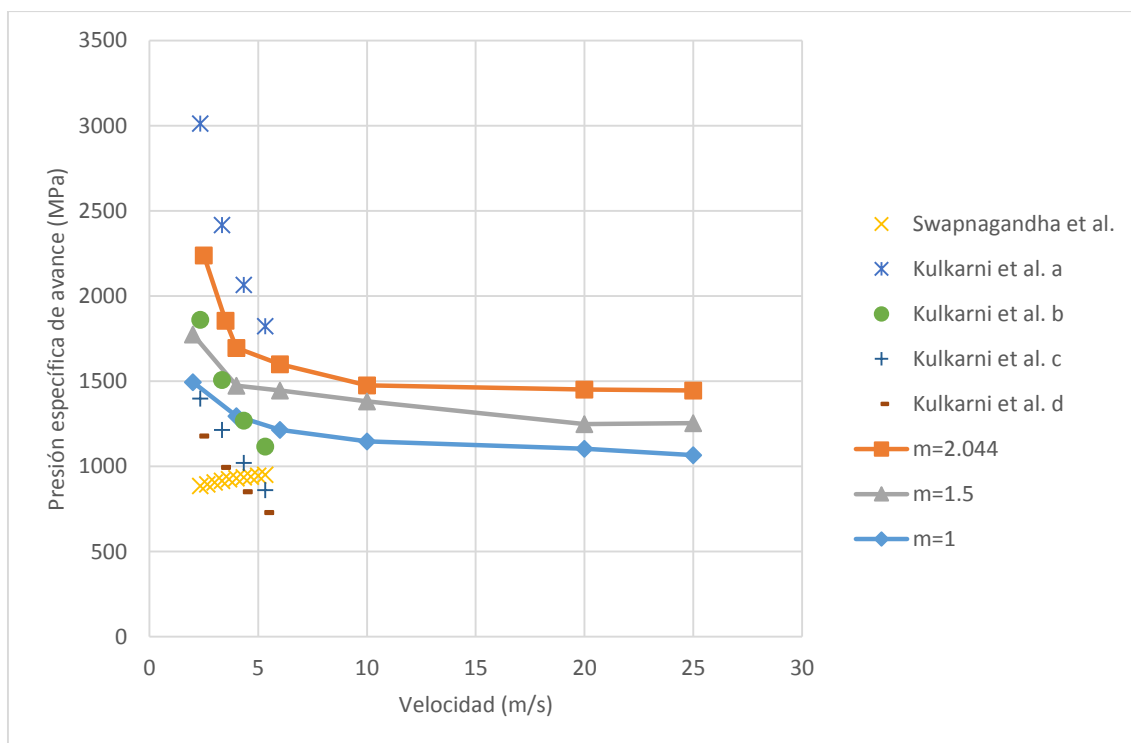


Figura 5.3 – Presiones específicas de avance experimentales y numéricas



Como se aprecia en la *Figura 5.2* y en la *Figura 5.3*, los resultados a bajas velocidades de corte correspondientes a las simulaciones numéricas se encuentran dentro de la nube de puntos experimentales. Además, la tendencia que presentan ambos resultados es similar. Todo esto indica que el modelo utilizado para las simulaciones numéricas es correcto, pues puede simular el proceso de corte ortogonal y predecir resultados con precisión. El modelo queda, por tanto, validado, y es posible utilizarlo para predecir otros resultados como son las fuerzas de corte, la morfología de la viruta y la longitud de contacto.

Las diferencias observadas entre los experimentos se deben a que no todos los ensayos se han realizado bajo las mismas condiciones de corte (ángulo de desprendimiento, profundidad de corte, avance, recubrimiento de herramienta, etc.), y a que no todos los aceros 304/304L ensayados han pasado por el mismo tratamiento térmico o no presentan el mismo acabado superficial.

### 5.3. Estudio de comportamiento en mecanizado del material original

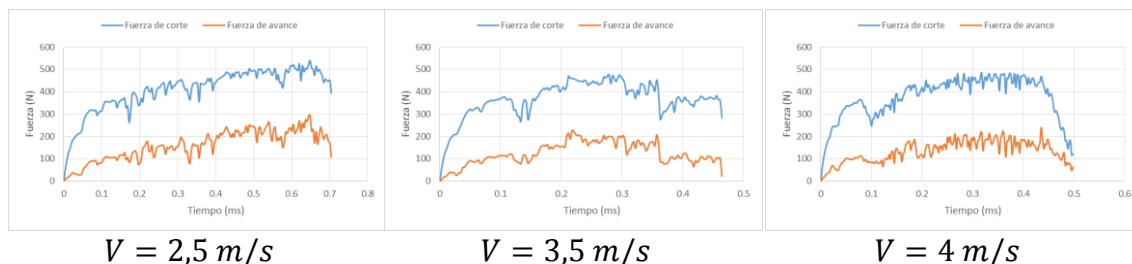
Con este estudio se pretende analizar el comportamiento del acero 304/304L durante su mecanizado, tanto a bajas como a altas velocidades de corte. Para ello se analizan en los distintos apartados las fuerzas de corte y de avance producidas durante el mecanizado, así como las magnitudes relacionadas con la viruta como son la morfología, el espesor y la longitud de contacto. También se dedica un apartado para analizar el ángulo de cizallado.

Se han utilizado las propiedades del material de la *Tabla 4.2* y el primer juego de parámetros que aparece en la *Tabla 4.3*.

Para tratar los resultados de estas simulaciones se ha seguido la metodología descrita en *5.1 Descripción de las simulaciones y resultados a analizar*, es decir, se han dado por válidas aquellas que tenían una etapa estable en su evolución de las fuerzas de corte y de avance. Por este motivo se han considerado válidas las simulaciones realizadas a 2,5 m/s, 3,5 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 25 m/s.

#### 5.3.1. Fuerzas de corte y de avance

En la *Figura 5.4* se muestran los datos de las fuerzas de corte y de avance que facilita *Abaqus/Explicit* representados en gráficas en función del tiempo. En color azul están representados los datos de la fuerza de corte, mientras que en color naranja lo están los datos de la fuerza de avance.



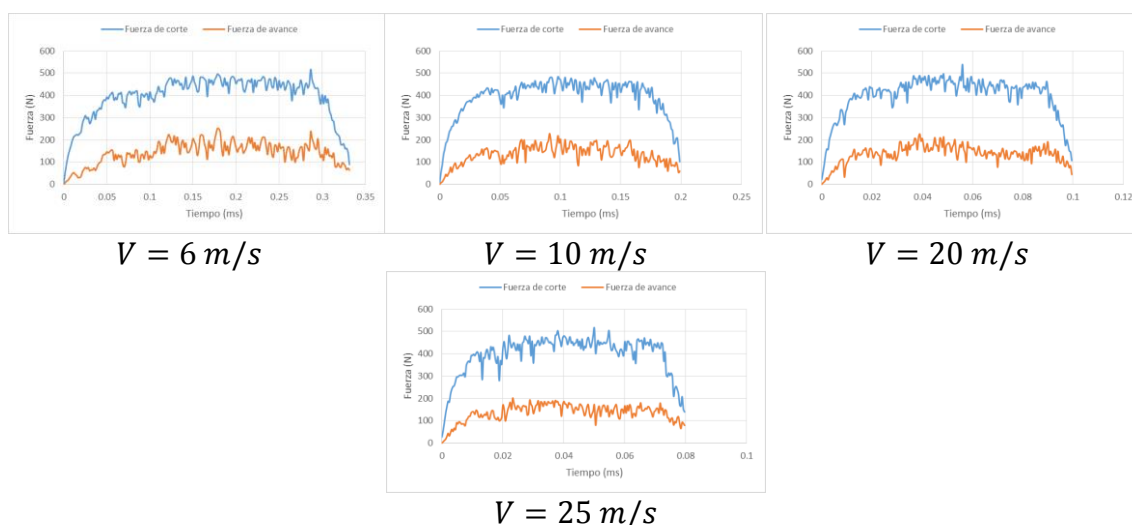


Figura 5.4 – Fuerzas de corte y de avance en el estudio de comportamiento en mecanizado del material original

Se puede observar que para todas las velocidades la forma de las curvas son parecidas, distinguiéndose tres etapas claramente diferenciadas. En primer lugar, al comienzo de éstas se aprecia una etapa en la que la fuerza es inestable y creciente. Esto se debe a que al principio no existe una viruta que ofrezca resistencia a la herramienta para que ésta sea cortada y, conforme pasa el tiempo, sale apoyándose en la herramienta. Pasado un tiempo el valor de la fuerza alcanza un valor estable y el proceso se convierte en estacionario. Por último, se aprecia una etapa en que las fuerzas disminuyen hasta llegar a ser nulas, hecho que ocurre porque la herramienta va llegando a la longitud de mecanizado prefijada, y por lo tanto va dejando de haber viruta.

Este comportamiento se da en todos los casos excepto para las simulaciones a velocidades de  $2,5 \text{ m/s}$  y  $3,5 \text{ m/s}$ , que fueron abortadas antes de tiempo por el propio *Abaqus/Explicit*. Además, en la velocidad de  $3,5 \text{ m/s}$  se puede observar un descenso repentino de los valores de fuerzas cuando debía haber una etapa estable. Esto se debe a que durante simulación la viruta se rompió. Sin embargo, se puede escoger como etapa estable aquella que se da justo antes del corte de la viruta.

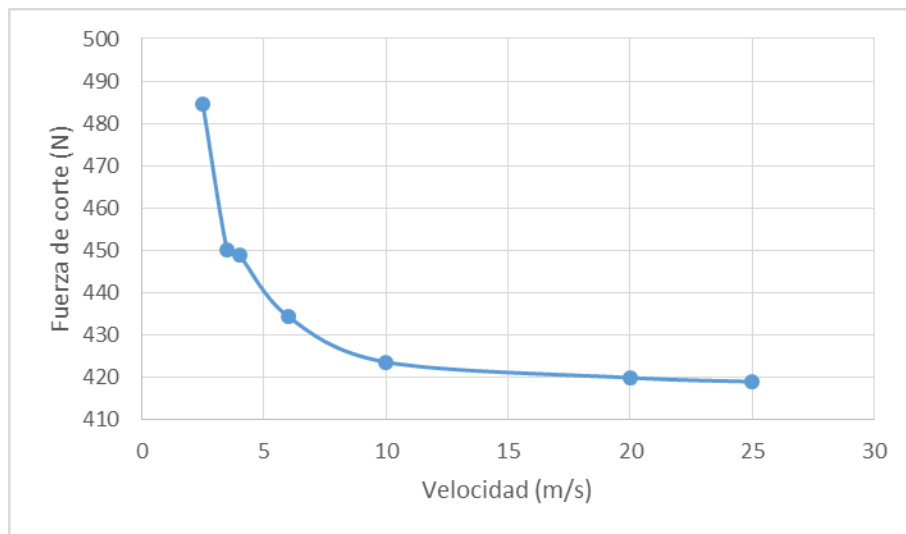
Para caracterizar cada simulación con un único valor de fuerza (ya sea fuerza de corte o fuerza de avance) se toma una media de las zonas estables. Estos valores se pueden ver en la *Tabla 5.1* en función de la velocidad de corte.

Tabla 5.1 – Valores de fuerzas de corte y fuerzas de avance en función de la velocidad de corte

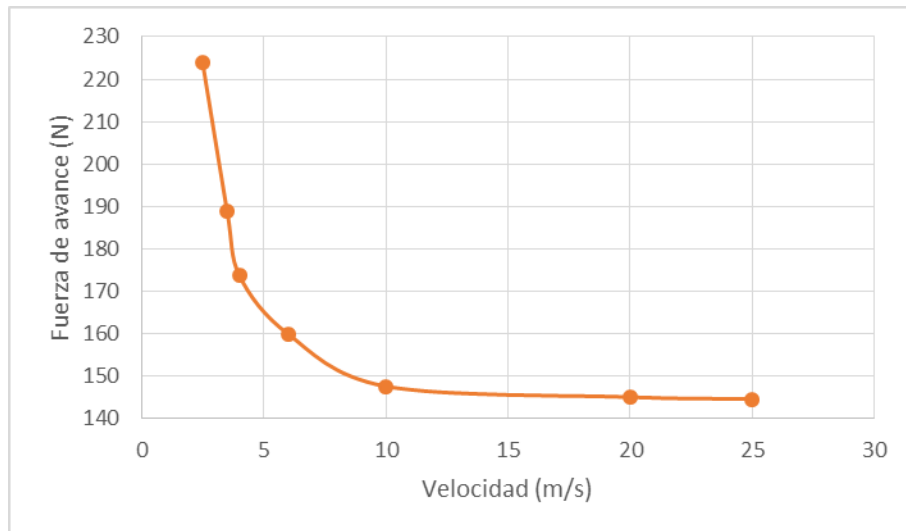
Velocidad de corte ( $\text{m/s}$ )	Fuerza de corte ( $N$ )	Fuerza de avance ( $N$ )
2,5	485	224
3,5	446	186
4	444	170
6	434	160
10	424	148
20	420	145
25	419	145



En la *Figura 5.5* y en la *Figura 5.6* están representados los valores de la *Tabla 5.1*. Para la fuerza de corte y para la fuerza de avance se observa el mismo comportamiento frente a la velocidad: cuando ésta aumenta, las fuerzas disminuyen hasta alcanzar un valor determinado, el cual no cambiará aunque se siga aumentando la velocidad de corte. Como ya se comentó en 3.2 *Presiones específicas de corte y avance*, este comportamiento se debe a que a velocidades de corte altas se produce mucho calor que no puede ser evacuado y origina un ablandamiento del material. La fricción, por tanto, también cae cuando aumenta la velocidad ya que es más fácil arrancar material, y esto se puede ver representado en la *Figura 5.7*.



*Figura 5.5 – Fuerza de corte en función de la velocidad*



*Figura 5.6 – Fuerza de avance en función de la velocidad*



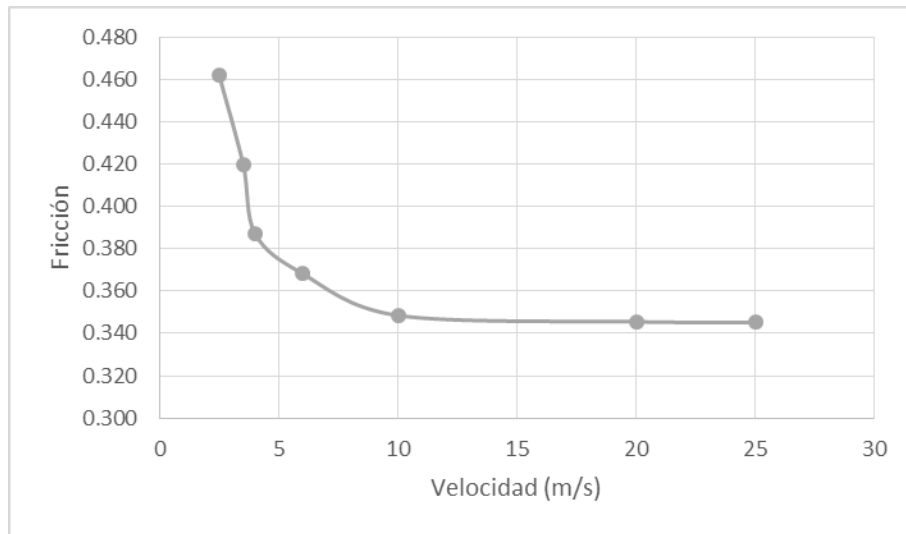
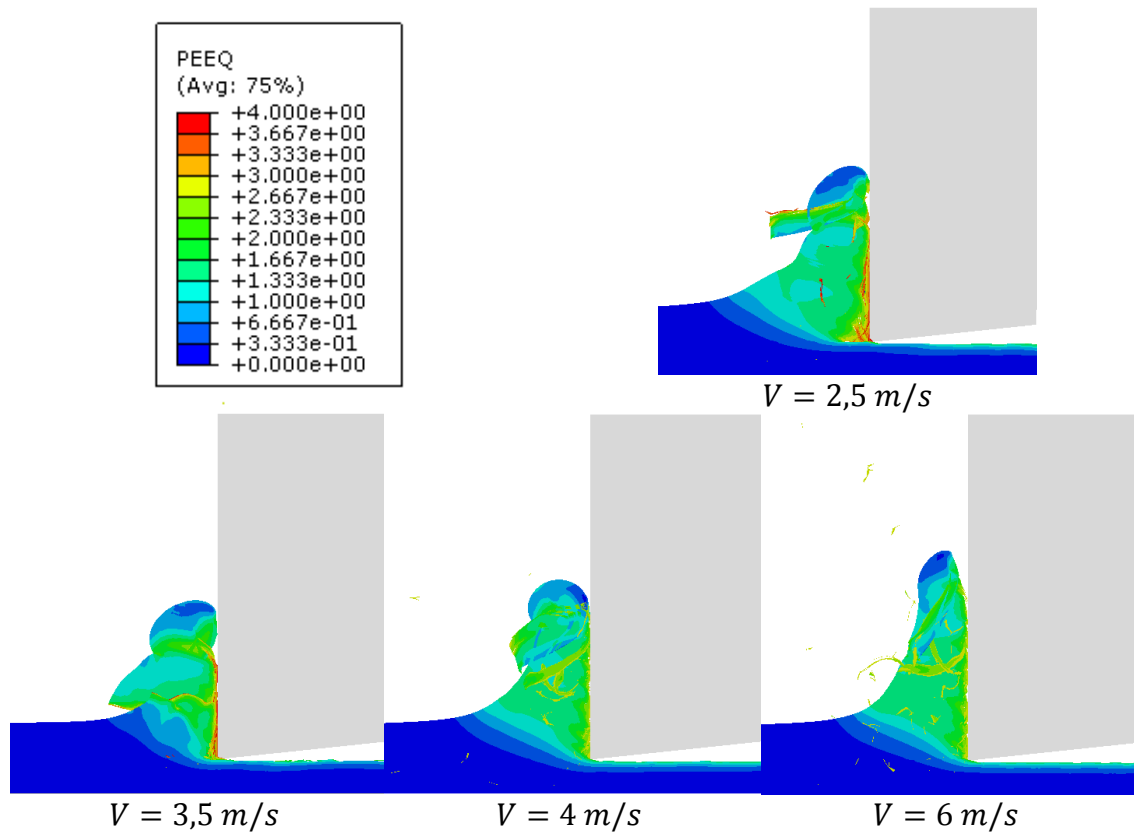


Figura 5.7 – Fricción en función de la velocidad de corte

### 5.3.2. Morfología de viruta

La morfología de la viruta se estudia con el fin de observar los efectos de la velocidad en ésta. En la *Figura 5.8* se muestran las imágenes proporcionadas por *Abaqus/Explicit* para cada velocidad de corte simulada, todas ellas tomadas a una determinada longitud de mecanizado y manteniendo constantes los niveles de deformación de la leyenda, con el fin de compararlas entre ellas.



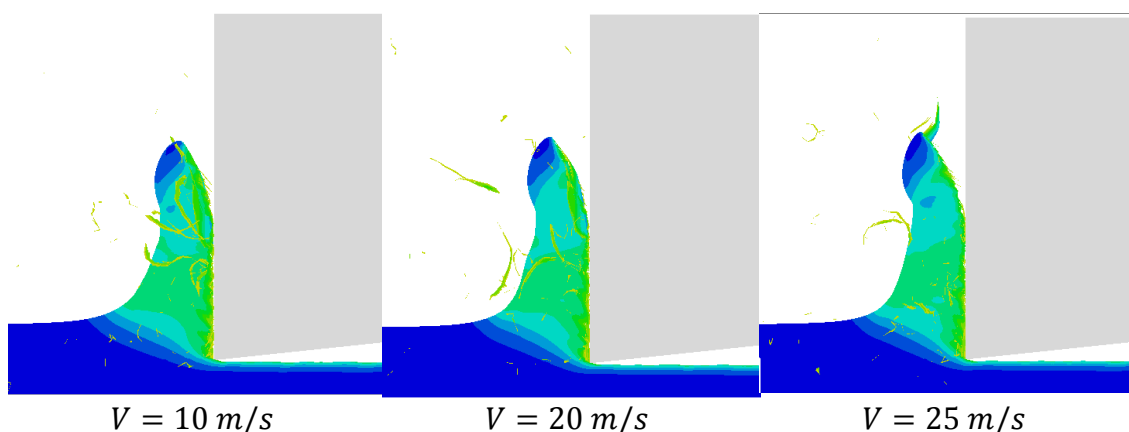


Figura 5.8 – Morfología de la viruta a distintas velocidades

Lo primero que llama la atención es que se trata de una viruta continua, que concuerda con la viruta real del acero 304/304L. Se aprecia que a bajas velocidades la viruta es propensa a romperse irregularmente, y conforme aumenta la velocidad se hace más consistente. Esto último es lo deseable, ya que una viruta rota origina vibraciones en la máquina herramienta que acorta su vida en servicio. Además, otro hecho observable es que la viruta se hace más esbelta a medida que aumenta la velocidad de corte, es decir, el espesor se va reduciendo, lo que concuerda con lo comentado en 3.3 *Espesor de viruta*.

Por otro lado, si se observan detenidamente la Figura 5.4 y la Figura 5.8 se aprecia la existencia de una relación entre ambas. Cuando la viruta se rompe, ésta deja de presionar a la herramienta y provoca un descenso repentino de las fuerzas de corte, que actúan directamente en la herramienta en forma de vibraciones. En cambio, una viruta esbelta produce una mayor estabilidad en las fuerzas de corte.

### 5.3.3. Espesor de viruta

Como se ha comentado en el apartado anterior, a partir de la Figura 5.8 es posible decir que la viruta se hace más fina cuanto mayor es la velocidad de corte. Con *Abaqus/Explicit* es posible analizar más detalladamente este hecho. Para ello, se amplía la imagen para tener una mejor visión de la zona de la viruta, y se mide el espesor de ésta en una zona que sea estable, que en este caso resulta ser en el punto justo antes de que la viruta se despegue de la herramienta, y permita caracterizarla. Los valores obtenidos en las simulaciones se han representado en función de la velocidad de corte en la Figura 5.9, donde se observa una tendencia decreciente, y una caída más acusada cuando las velocidades de corte son bajas.

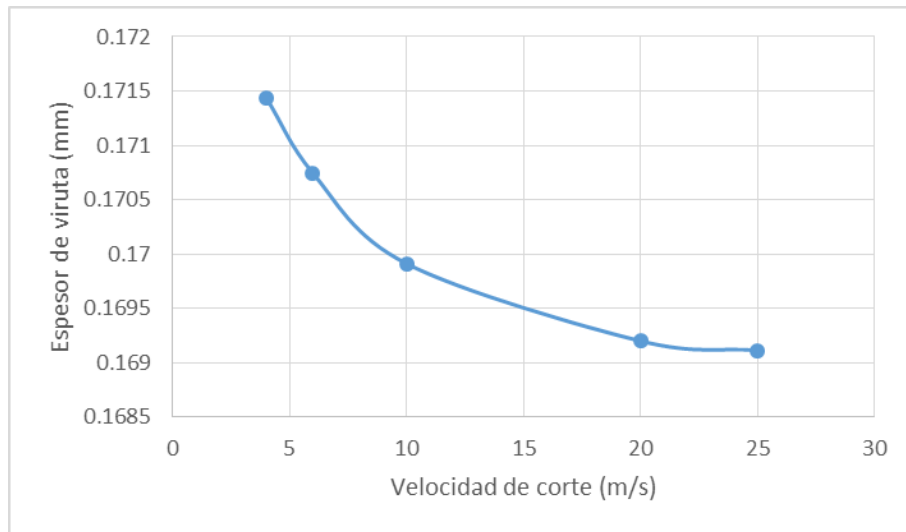


Figura 5.9 – Espesor de la viruta en función de la velocidad

En la Figura 5.10 se ha realizado una comparación de los espesores de viruta obtenidos en las simulaciones con los obtenidos experimentalmente.

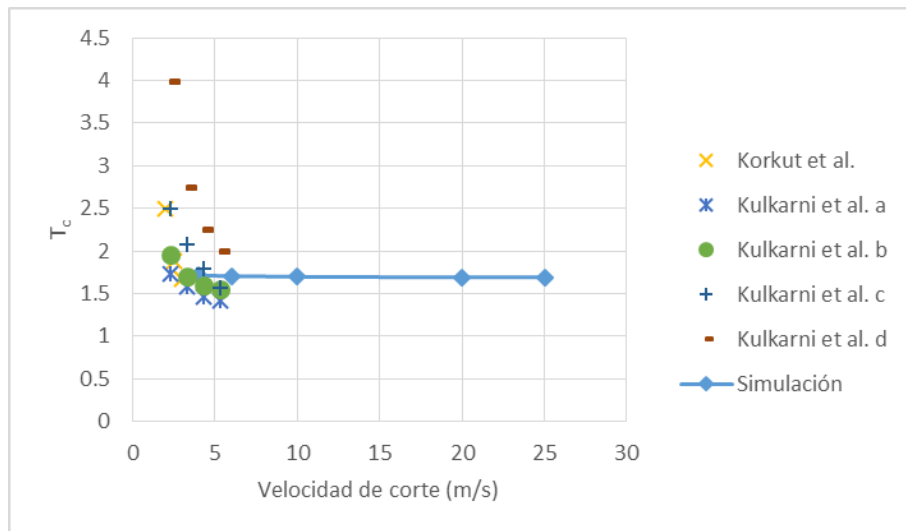


Figura 5.10 – Comparación de espesor de viruta obtenido con los resultados experimentales

Los valores experimentales corresponden a velocidades de corte bastante bajas en comparación con el rango utilizado en las simulaciones, y por ello presentan el cambio de  $T_c$  tan abrupto. Sin embargo, este valor se va suavizando conforme se aumenta la velocidad de corte. Como se puede apreciar en la Figura 5.10, los valores de  $T_c$  de las simulaciones son similares a los experimentales, lo que permite validar nuevamente el modelo.

#### 5.3.4. Longitud de contacto

En las simulaciones también se ha analizado los valores que ha ido adquiriendo la longitud de contacto conforme aumentaba la velocidad de corte.

Los valores de longitud de contacto de las simulaciones se han obtenido a partir de *Abaqus/Explicit*: a partir de la evolución de la temperatura en el plano de desprendimiento de la herramienta, se escoge como longitud de contacto la distancia a la que aparece una caída muy brusca de la temperatura. Este criterio se basa en que cuando la viruta está apoyada sobre la herramienta se genera entre ambas una fricción que desemboca en un aumento de la temperatura. Cuando la viruta deja de tocar la herramienta, no existe fricción y la temperatura de ésta vuelve a ser próxima a la ambiente. En la *Figura 5.11* se muestran las imágenes de las temperaturas alcanzadas en la herramienta para cada velocidad de corte.

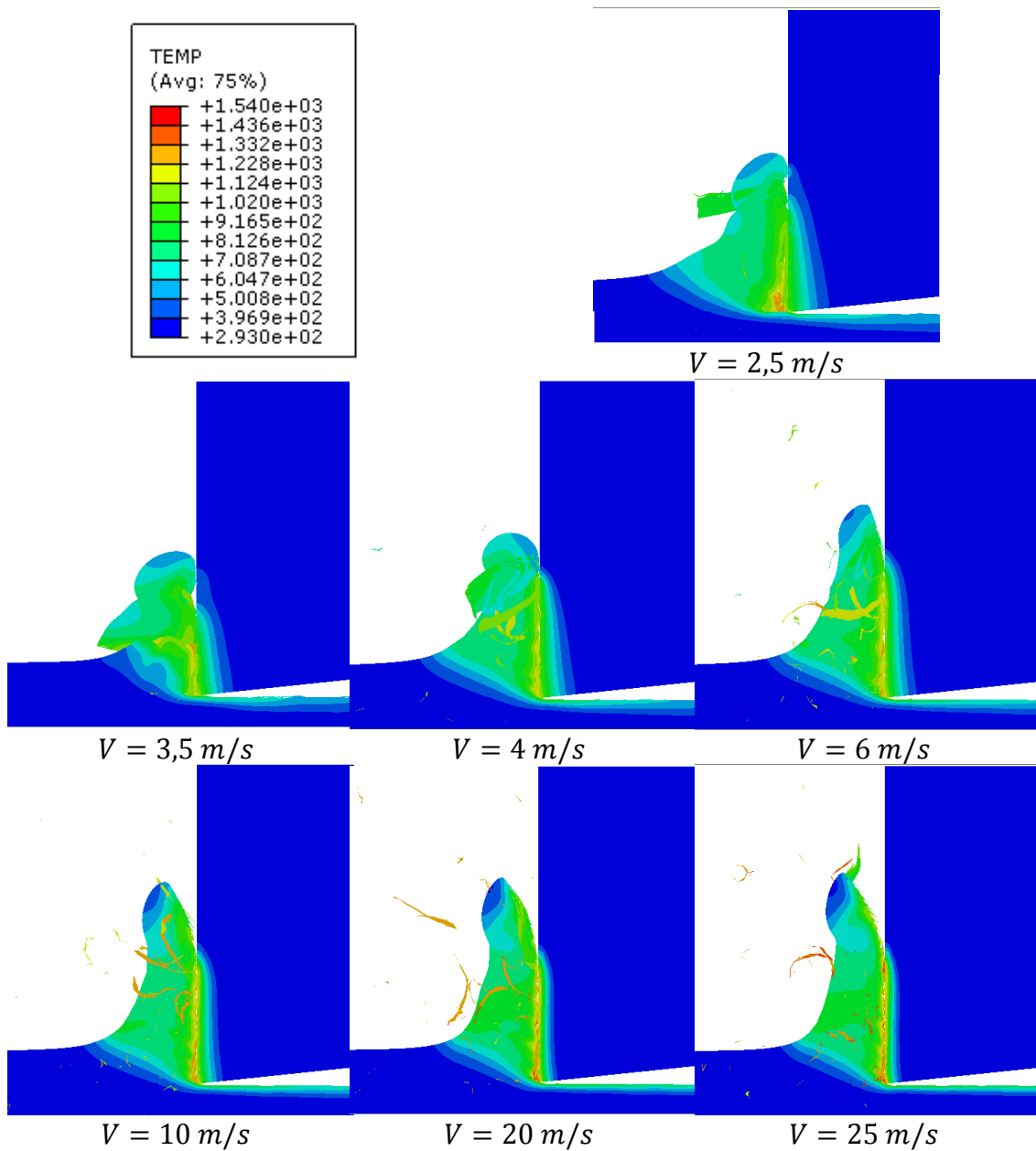


Figura 5.11 – Temperatura de la herramienta para cada velocidad de corte

En la *Figura 5.12* se han representado las longitudes de contacto de las simulaciones en función de la velocidad. Se observa que la longitud de contacto apenas varía a velocidades



de corte altas, mientras que presenta una caída a velocidades de corte bajas. A altas velocidades de corte la longitud de contacto se mantiene más o menos constante, y esto puede deberse a que en la determinación de la longitud de contacto intervienen distintos parámetros que no se han discutido en este análisis.

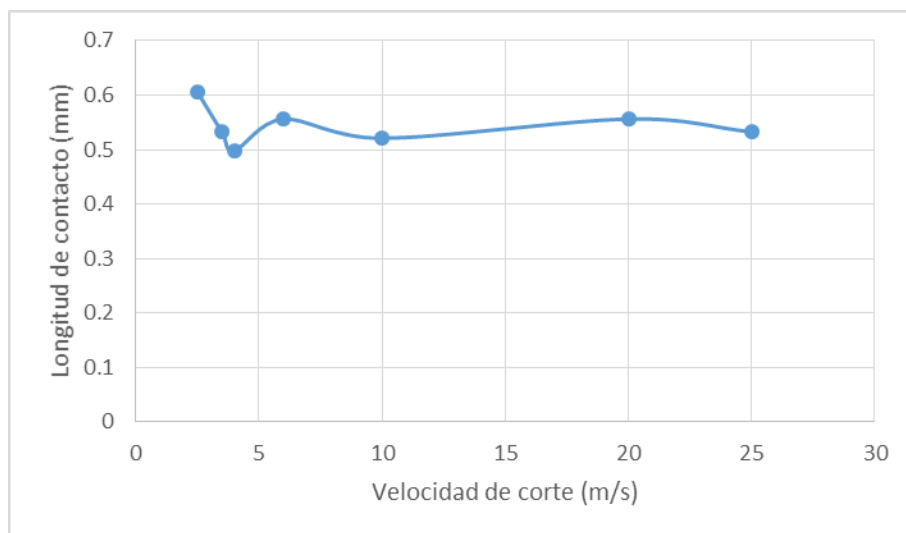


Figura 5.12 – Longitud de contacto en función de la velocidad de corte

En la Figura 5.13 se ha representado la longitud de contacto junto a los valores obtenidos por Grzesik y Nieslony [23], utilizando la Ecuación [ 5.2 ], que elimina la dependencia que tiene con el avance, para poder comparar los datos entre los ensayos:

$$L_c = \frac{l_c}{a} \quad [ 5.1 ]$$

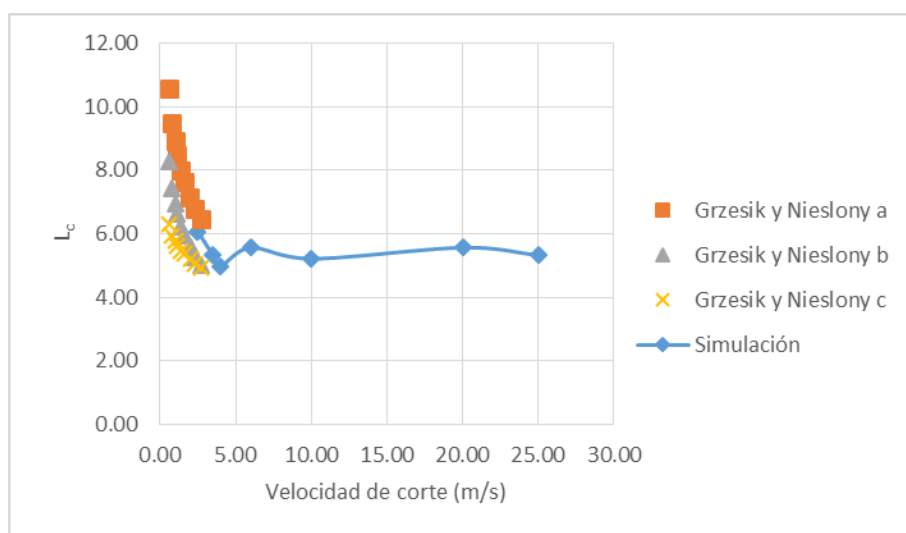


Figura 5.13 – Comparación de longitud de contacto obtenida con los resultados experimentales

Se observa una tendencia similar en los resultados de la simulación y en los experimentales. Esto da credibilidad a los resultados de las simulaciones, ya que se asemejan a la realidad.

### 5.3.5. Ángulo de cizallado

El ángulo de cizallado tiene gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte, pues afecta a los requisitos de fuerza y potencia, el espesor de la viruta y la temperatura. Entre las muchas relaciones del ángulo de cizallado, todas muy parecidas, una de ellas es [4]:

$$\phi = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\beta}{2} \quad [ 5.2 ]$$

Donde:

- $\phi$  es el ángulo de cizallado.
- $\gamma$  es el ángulo de desprendimiento.
- $\beta$  es el ángulo de fricción.

El ángulo de fricción  $\beta$  está relacionado con el coeficiente de fricción  $\mu$  mediante la siguiente expresión:

$$\mu = \tan \beta \quad [ 5.3 ]$$

Por tanto, según la *Ecuación* [ 5.2 ], se puede afirmar que el ángulo de cizallado aumenta cuando la fricción disminuye.

El acero 304/304L se caracteriza por tener únicamente zona primaria de cizallamiento cuando es mecanizado, como se comentaba en 2.2.4 *Viruta*. Sin embargo, resulta difícil determinar el ángulo de cizallado puesto que en el corte de este material no está bien definido el plano de cizallamiento, como se puede observar en *Figura 5.14*. Aunque no es lo correcto, se ha determinado el ángulo de cizallado a partir de dos expresiones: la *Ecuación* [ 2.4 ] y la *Ecuación* [ 5.2 ].

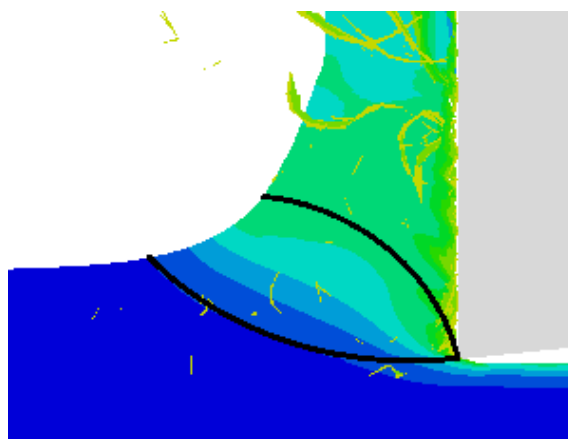


Figura 5.14 – Zona primaria de cizallamiento en acero 304/304L

En la *Figura 5.15* se ha representado la evolución del ángulo de cizallado conforme aumenta la velocidad de corte. Para ello, se ha utilizado la *Ecuación* [ 2.4 ] y la *Ecuación* [ 5.2 ], a las que les corresponde el nombre  $\phi_1$  y  $\phi_2$  en la leyenda, respectivamente. Se



puede observar que ambas curvas presentan una tendencia creciente conforme aumenta la velocidad, y las diferencias existentes entre ellas se deben a que las expresiones dadas anteriormente sirven para obtener aproximadamente un valor del ángulo de cizallado. A pesar de ello, los valores son similares.

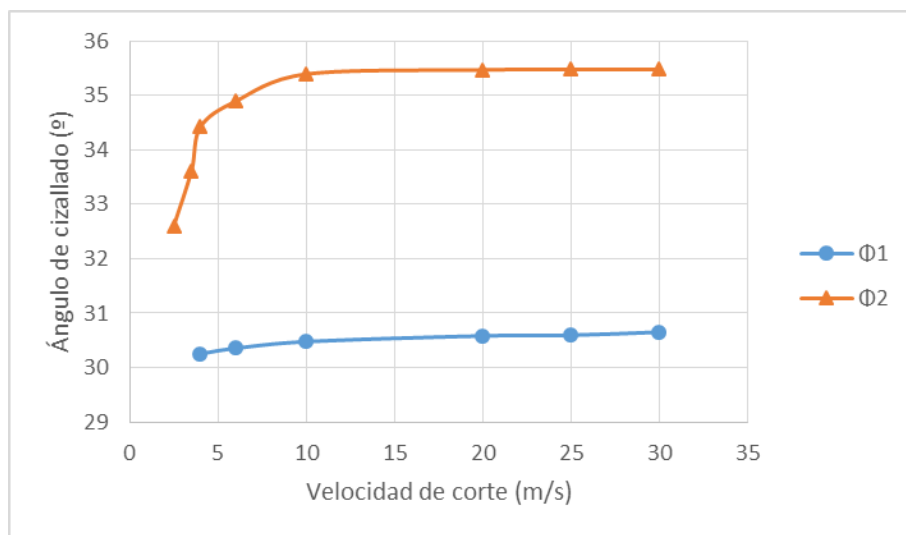


Figura 5.15 – Ángulo de cizallado en función de la velocidad de corte

#### 5.4. Estudio paramétrico sobre la sensibilidad a la temperatura

Como se comentó anteriormente, el objetivo de este estudio es observar la influencia que tiene la sensibilidad a la temperatura mediante el parámetro  $m$  de la ecuación constitutiva de Johnson–Cook sobre el comportamiento en mecanizado del acero 304/304L, analizando las mismas variables que en 5.3 *Estudio de comportamiento en mecanizado del material original* para distintos valores de  $m$ , y utilizando la misma metodología.

Las propiedades del material utilizadas para las simulaciones son las mismas que para el primer estudio, y también lo son los parámetros de la ecuación de Johnson–Cook, a excepción de  $m$ . Los valores escogidos para  $m$  en este estudio son 1 y 1,5, y se utilizarán también los resultados del estudio anterior, que tiene una  $m$  de valor 2,044. Las velocidades de corte simuladas en este estudio son de 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 25 m/s, y aunque en el primer estudio se utilizaron velocidades de corte distintas, esto no influirá en el análisis ya que lo importante es la forma de las curvas de resultados y la tendencia de éstas.

##### 5.4.1. Fuerzas de corte y de avance

Para la obtención de las fuerzas de corte y de avance se ha procedido como en 5.3.1 *Fuerzas de corte y de avance*, es decir, se ha tomado la media de los valores en las etapas estables. Los valores obtenidos están en la *Tabla 5.2*.



Tabla 5.2 – Valores de fuerzas de corte y de avance para distintas velocidades de corte y distintos valores de  $m$

Velocidad de corte (m/s)	$m = 1$		$m = 1,5$		$m = 2,044$	
	Fuerza de corte (N)	Fuerza de avance (N)	Fuerza de corte (N)	Fuerza de avance (N)	Fuerza de corte (N)	Fuerza de avance (N)
2	342	149	418	178	—	—
2,5	—	—	—	—	485	224
3,5	—	—	—	—	446	186
4	330	130	388	147	444	170
6	325	121	383	144	434	160
10	324	115	389	138	424	148
20	322	110	379	125	420	145
25	321	107	379	125	419	145

En la *Figura 5.16* y *Figura 5.17* se pueden observar estos valores representados en gráficas. En ambas figuras se da el mismo comportamiento respecto a  $m$ : cuanto menor es la sensibilidad a la temperatura, menor es el nivel de tensiones alcanzado en el material. Este hecho se puede predecir a partir de la ecuación constitutiva de Johnson–Cook (*Ecuación [ 2.15 ]*), ya que un incremento en  $m$  produce una disminución en el término correspondiente a la temperatura, es decir, el material sufre un mayor ablandamiento por la temperatura, y como consecuencia, experimenta una reducción de la tensión.

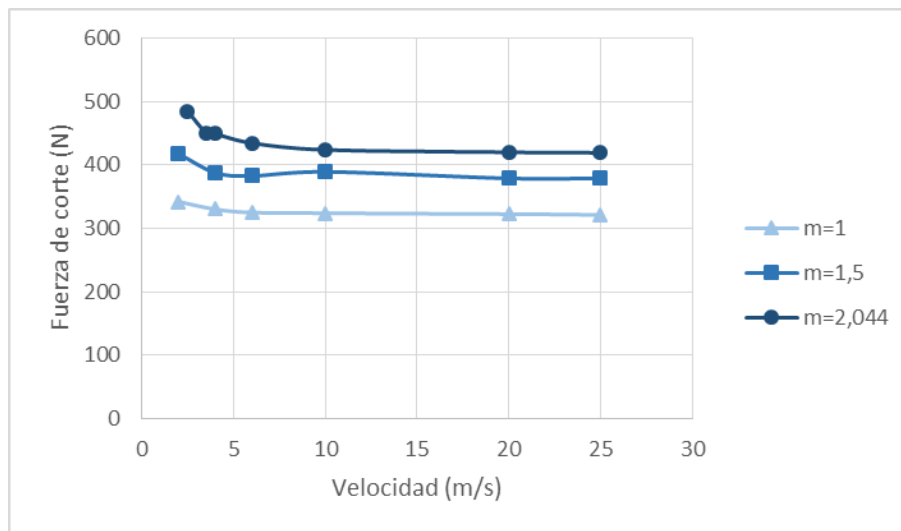


Figura 5.16 – Comparación de fuerzas de corte para distintos valores de  $m$



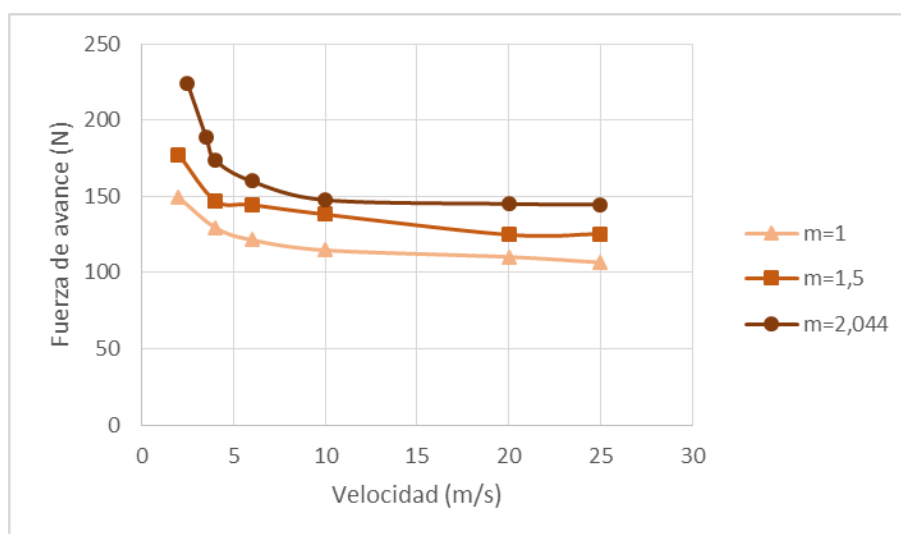


Figura 5.17 – Comparación de fuerzas de avance para distintos valores de  $m$

Por otro lado, un mayor ablandamiento como consecuencia de la temperatura provoca una reducción de la fricción, ya que se generan tensiones menores y es más fácil que la viruta sea arrancada. Este hecho se puede apreciar en la Figura 5.18, donde se representan las curvas de fricción para distintos valores de  $m$ . Se ve que los valores más altos de la fricción corresponden a las simulaciones llevadas a cabo con  $m = 2,044$ . Los valores más bajos de fricción pertenecen a los casos para  $m = 1$  y  $m = 1,5$ .

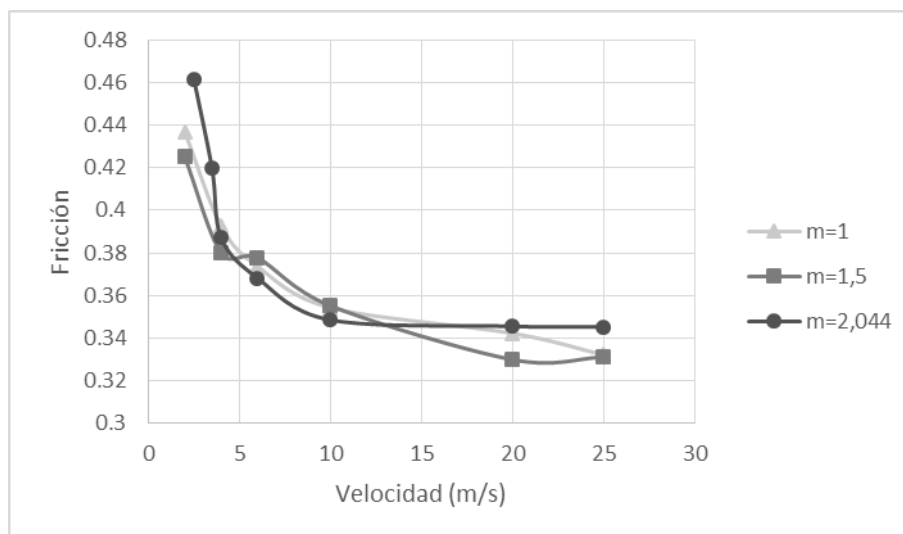


Figura 5.18 – Comparación de fricción para distintos valores de  $m$

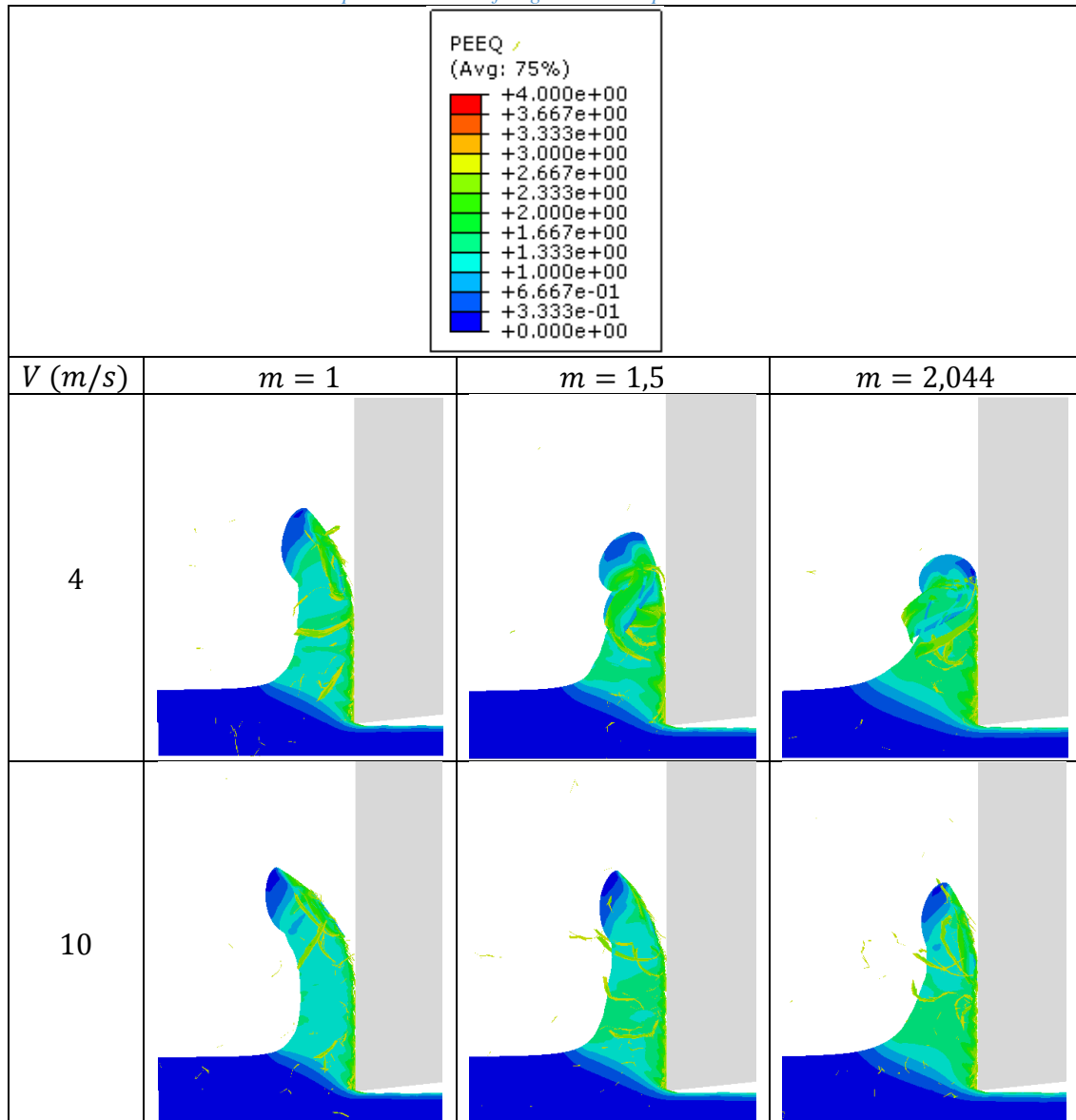
#### 5.4.2. Morfología de viruta

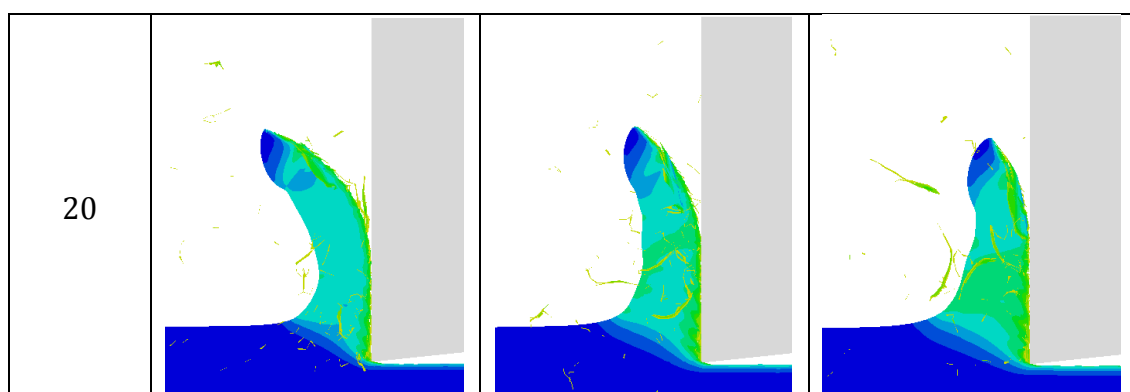
En la Tabla 5.3 se muestran las imágenes proporcionadas por *Abaqus/Explicit* en las que se puede ver la morfología de la viruta para cada valor de  $m$ . Con el fin de no saturar por exceso de imágenes se muestran sólo las correspondientes a la velocidades de 4 m/s, 10 m/s y 20 m/s.



A la vista de las imágenes de la *Tabla 5.3* se puede afirmar que los niveles de deformación son aproximadamente los mismos en todas las simulaciones, y del apartado anterior se sabe que las fuerzas originadas en la herramienta son menores. Este hecho permite comprobar de manera indirecta que es más fácil arrancar material cuando el valor del parámetro  $m$  disminuye.

*Tabla 5.3 – Comparación de morfología de viruta para distintos valores de  $m$*





Otro efecto observable a partir de la *Tabla 5.3* es que, fijada una velocidad de corte y observando las imágenes correspondientes a distintos valores de  $m$ , se alcanza mayor esbeltez conforme disminuye la velocidad. Así, con una velocidad de 4 m/s se tiene una viruta sin fisuras para  $m = 1$ , mientras que para  $m = 2,044$  la viruta se encuentra seccionada en el extremo más alejado de la zona de corte. Esto se debe principalmente a que al comienzo del mecanizado, cuando la generación de calor es muy baja, son necesarios altos niveles de tensión para arrancar la viruta que llegan a sobrepasar el límite de rotura del material. Durante el resto del mecanizado la generación de calor llega a niveles más altos y provoca el ablandamiento del material, disminuyendo el nivel de tensiones necesario para que el material se separe por el efecto de la herramienta.

Por otro lado, a la vista de los comentarios realizados sobre la morfología de viruta, es posible afirmar que el efecto que tiene la disminución del parámetro  $m$  es el mismo que tiene el aumento de la velocidad de corte: ambas variaciones hacen que el material se ablande térmicamente y sea más fácil arrancar material.

#### 5.4.3. Espesor de viruta

En la *Figura 5.19* se puede observar el efecto de  $m$  sobre el espesor de la viruta. Se aprecia que cuando el valor de  $m$  disminuye, también lo hace el espesor de viruta. Por otro lado, otro efecto que se puede observar es que cuando  $m$  decrece, la evolución del espesor de viruta en función de la velocidad decrece más rápidamente. La disminución del parámetro  $m$  hace que el material se ablande a causa de la temperatura más rápidamente y, combinado con el efecto térmico que produce la velocidad de corte, provoca la rápida caída de los valores del espesor de viruta.

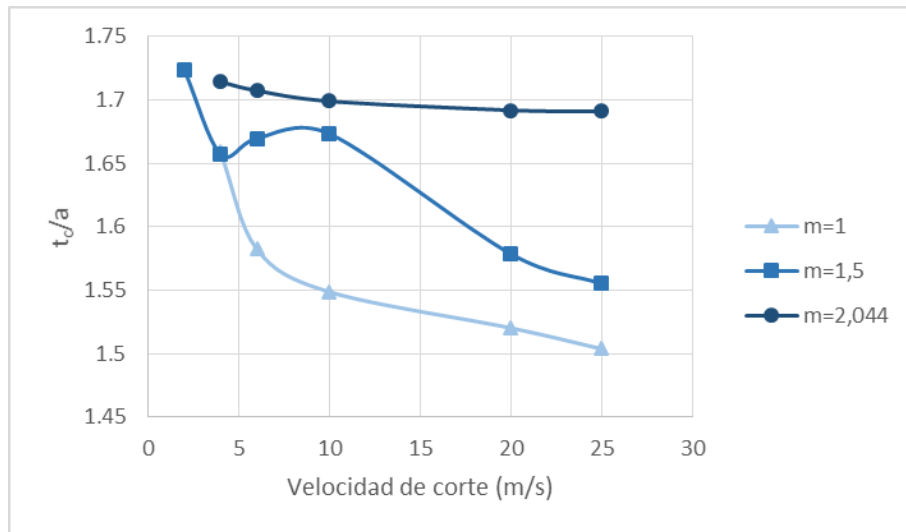


Figura 5.19 – Comparación de espesor de viruta para distintos valores de  $m$

#### 5.4.4. Longitud de contacto

En cuanto a la longitud de contacto, se procede de igual manera que para el primer estudio: los valores se obtienen a partir de la evolución de la temperatura en la herramienta, como consecuencia de la fricción entre ésta y la viruta.

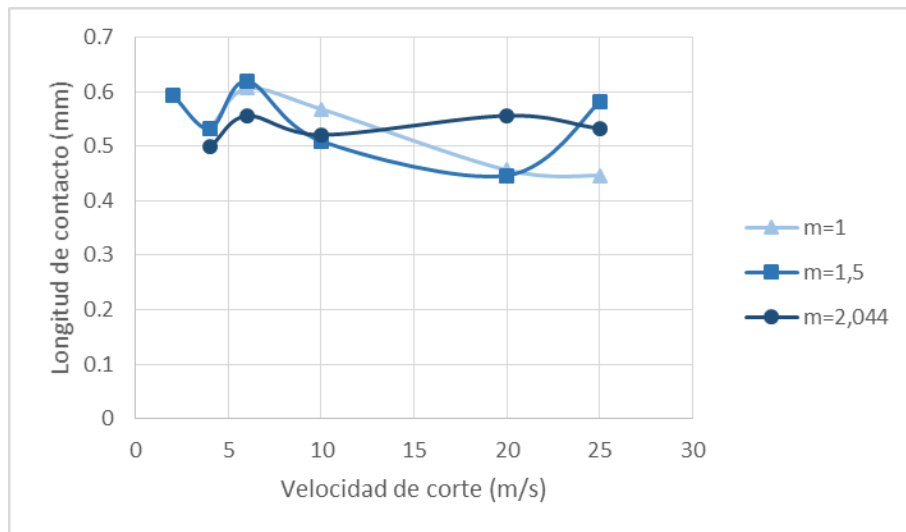


Figura 5.20 – Comparación de longitud de contacto para distintos valores de  $m$

En la Figura 5.20 se han representado las curvas para los tres valores de  $m$ . En teoría la longitud de contacto debería ser menor cuanto menor es el parámetro  $m$ , ya que la fricción disminuye y esto hace que la viruta quede menos adherida a la herramienta. A la vista de los datos, no es posible distinguir un comportamiento por efecto de la variación de  $m$ . Si bien es cierto que las longitudes de contacto disminuyen en cada caso cuando aumenta la velocidad de corte, no existe una relación clara que permita explicar el efecto del parámetro  $m$  sobre la longitud de contacto.



#### 5.4.5. Ángulo de cizallado

Por último, en la *Figura 5.21* se han representado todas las curvas de evolución de ángulo de cizallado en función de la velocidad de corte para los distintos valores de  $m$ , únicamente con la *Ecuación [ 2.4 ]*. El efecto que produce  $m$  es bastante notable: cuando disminuye, el ángulo de cizallado aumenta en gran medida. Esto concuerda con lo comentado en los apartados anteriores: el ángulo de cizallado aumenta cuando la fricción disminuye, y cuando  $m$  se reduce el efecto que se está produciendo justamente es el de la reducción de fricción como consecuencia del ablandamiento del material.

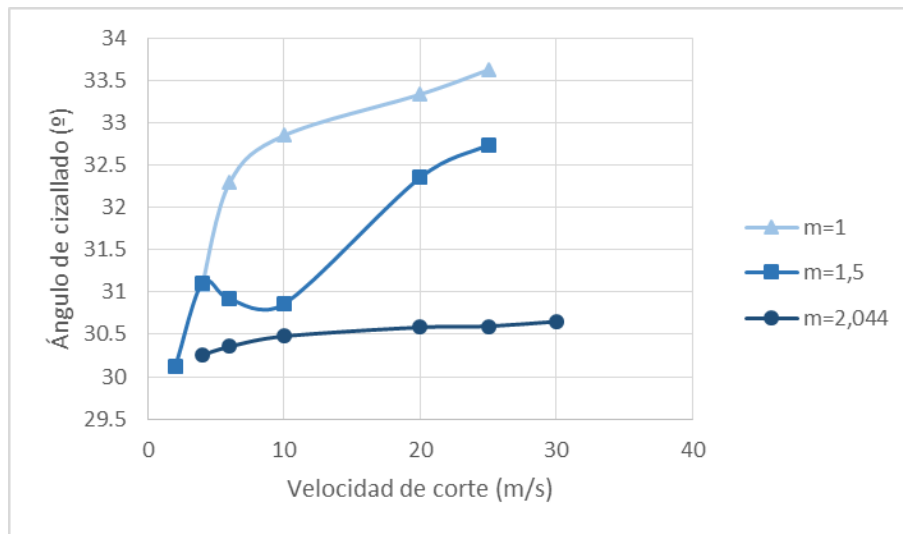


Figura 5.21 – Comparación de ángulo de cizallado para distintos valores de  $m$



# Capítulo VI

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

El último capítulo del proyecto tiene como objetivo realizar una recapitulación de las conclusiones que se han ido obteniendo al analizar en detalle determinados parámetros de las simulaciones. Además, incluye un apartado donde se proponen trabajos futuros cuyo estudio puede resultar de gran interés en el proceso de mecanizado del acero 304/304L, y que pueden ayudar a complementar este proyecto.

### 6.1. Conclusiones

Los objetivos de este proyecto consistían en el análisis y la validación del modelo propuesto para los aceros inoxidables, en concreto para el acero 304/304L, mediante los resultados de los ensayos experimentales de la bibliografía. Además, también se pretendía ver cómo influye la sensibilidad a la temperatura mediante el parámetro  $m$  de la ecuación constitutiva de Johnson–Cook sobre los distintos parámetros de mecanizado observados en el análisis.

Gracias a los resultados obtenidos, el presente proyecto puede ser considerado como un documento de referencia sobre el mecanizado del acero 304/304L. Las conclusiones que se pueden obtener de este proyecto son:

1. Los resultados del modelo utilizado para el acero 304/304L han sido analizados y validados frente a los resultados de los ensayos experimentales llevados a cabo por Swapnagandha et al. [22], Grzesik y Nieslony [23], Kulkarni et al. [26] y Korkut et al. [27], ya que las tendencias de las fuerzas de corte y de avance son las mismas, y los valores numéricos son similares.
2. Las fuerzas de corte y de avance producidas en la herramienta disminuyen cuando aumentan la velocidad de corte. Esto se debe a que a altas velocidades se genera mucho calor, que al no poder ser evacuado hace que el material se ablande y sea más fácil arrancar la viruta del material.
3. El coeficiente de fricción ejerce bastante influencia sobre la mecánica del corte. De todos los parámetros analizados en este proyecto, la fricción afecta claramente al espesor de la viruta, a la longitud de contacto y al ángulo de cizallado. Por ello, conocer este valor es crucial para determinar la potencia necesaria para el mecanizado.
4. La viruta producida en el mecanizado del acero 304/304L es menos propensa a romperse cuanto mayor es la velocidad de corte empleada. En concreto, en las simulaciones esto ocurre a partir de una velocidad de corte de 6 m/s.



5. La morfología de la viruta resulta más consistente y más esbelta cuanto mayor es la velocidad de corte empleada. Si bien esto es deseable para que no se produzcan vibraciones en la máquina herramienta, se hace necesario un rompevirutas cuando se utiliza mecanizado de alta velocidad (MAV).
6. El espesor de viruta, la longitud de contacto y el ángulo de cizallado disminuyen conforme aumenta la velocidad de corte.
7. Una disminución en el parámetro  $m$  produce el mismo efecto que si se utiliza mecanizado de alta velocidad. Esto se debe a que a altas velocidades se genera mucho calor que provoca el ablandamiento del acero y, justamente, el acero se ablanda más por efectos térmicos si se disminuye el citado parámetro.
8. Por último, el ablandamiento del material térmicamente es, a la vista de las conclusiones anteriores, un fenómeno deseado ya que disminuye los requerimientos de potencia para mecanizar el material en cuestión.

## 6.2. Trabajos futuros

A continuación se proponen posibles objetos de estudio interesantes que surgen a partir de este proyecto, con el fin de poder complementar éste y seguir avanzando en la investigación del mecanizado a alta velocidad de los aceros inoxidable, en concreto del acero 304/304L.

1. Construir un modelo tridimensional que permita estudiar el corte oblicuo en los aceros inoxidable, ya que este tipo de corte es el que se da mayoritariamente en la industria.
2. Realizar un ensayo experimental de mecanizado a alta velocidad del acero 304/304L, simplificándolo mediante corte ortogonal, ya que se han observado muchos beneficios al utilizar altas velocidades de corte.
3. Analizar la influencia que tiene en los resultados utilizar distintos juegos de parámetros de la ecuación de Johnson–Cook.
4. Después de comprobar que el modelo utilizado es válido para simular las condiciones de corte reales, se podría usar dicho modelo para simular otros aceros inoxidable y analizar su comportamiento.
5. Estudiar la influencia de distintos parámetros de corte sobre el acero 304/304L, a excepción de la velocidad de corte que es el parámetro que varía en este proyecto. Por ejemplo, la profundidad de corte y el avance.
6. Estudiar la influencia de los distintos ángulos presentes en el corte sobre el acero 304/304L, como por ejemplo el ángulo de desprendimiento y el ángulo de incidencia.
7. Realizar un estudio sobre el daño y el desgaste que sufre la herramienta cuando se mecanizan los aceros inoxidable, con el fin de determinar su vida en servicio.



## 7. Presupuesto



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**Escuela Politécnica Superior**

**PRESUPUESTO DE PROYECTO**

**1.- Autor:** Alejandro Migueláñez Rosa.

**2.- Departamento:** Ingeniería Mecánica.

**3.- Descripción del Proyecto:**

*Título:* Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidables

*Duración (meses):* 5

*Tasa de costes Indirectos:* 20%

**4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):** 33.014 €

**5.- Desglose presupuestario (costes directos)**

### PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes)	Coste hombre mes (€)	Coste (€)	Firma de conformidad
Soldani, Xavier	—	Ingeniero Senior	1	4.289,54	4.289,54	
Migueláñez Rosa, Alejandro	—	Ingeniero	5	2.694,39	13.471,95	





### EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
3 ordenadores de cálculo	1.500,00	100	12	24	750,00
3 licencias de Abaqus	9.000,00	100	12	12	9.000,00
<b>Total</b>					<b>9.750,00</b>

d) Fórmula de cálculo de la Amortización:  $\frac{A}{B} \cdot C \cdot D$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

### SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
<b>Total</b>		<b>0,00</b>

### OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO<sup>e)</sup>

Descripción	Empresa	Costes imputable
<b>Total</b>		<b>0,00</b>

e) Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...



## 6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Precio (€)
Personal	17.761
Amortización	9.750
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	5.502
Total	33.014



## 8. Bibliografía

- [1] «World Steel Association,» [En línea]. Disponible en: <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/annual-steel-archive.html>. [Último acceso: 20 Abril 2015].
- [2] «ISSF - International Stainless Steel Forum,» [En línea]. Disponible en: [http://worldstainless.org/crude\\_steel\\_production/crude\\_2001\\_to\\_2010](http://worldstainless.org/crude_steel_production/crude_2001_to_2010). [Último acceso: 20 Abril 2015].
- [3] M. F. Ashby y D. R. H. Jones, Materiales para ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño, Barcelona: Reverté, 2008.
- [4] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 5ª ed., México: Pearson Educación, 2008.
- [5] «North American Stainless,» [En línea]. Disponible en: <http://www.northamericanstainless.com/wp-content/uploads/2010/10/Grade-304-304L.pdf>. [Último acceso: 8 Abril 15].
- [6] «Sandvik Coromant,» [En línea]. Disponible en: [http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_m\\_stainless\\_steel/pages/default.aspx#6](http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_m_stainless_steel/pages/default.aspx#6). [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [7] «ISSF - International Stainless Steel Forum,» [En línea]. Disponible en: [http://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/Chemical\\_and\\_petrochemical/Autoclaves.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/Chemical_and_petrochemical/Autoclaves.pdf). [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [8] «Super Tech Equipments,» [En línea]. Disponible en: [http://supertechequipments.com/industrial\\_heat\\_exchangers.html](http://supertechequipments.com/industrial_heat_exchangers.html). [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [9] «ISSF - International Stainless Steel Forum,» [En línea]. Disponible en: [http://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/ISSF\\_Stainless\\_Steel\\_in\\_Agricultural\\_Applications.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Agricultural_Applications.pdf). [Último acceso: 20 Abril 2015].
- [10] S. Schawab, «KevinMD.com,» [En línea]. Disponible en: <http://cdn.kevinmd.com/blog/wp-content/uploads/Surgical-instruments-big.jpg>. [Último acceso: 25 Abril 2015].



- [11] «Nutricion.pro,» [En línea]. Disponible en: <http://www.nutricion.pro/wp-content/uploads/2007/10/menaje.jpg>. [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [12] «Muy house,» [En línea]. Disponible en: <http://www.muyhouse.com/image/data/2014-05-12/rich/juego-de-bano-5-accesorios-acero-inoxidable.jpg>. [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [13] «Sears mi casa,» [En línea]. Disponible en: <http://www.searsmicasa.com/wp-content/uploads/2014/02/Cubiertos-1.jpg>. [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [14] «Wikipedia,» [En línea]. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Arco\\_Gateway](http://es.wikipedia.org/wiki/Arco_Gateway). [Último acceso: 27 Abril 2015].
- [15] «FOAA Estudio,» [En línea]. Disponible en: <http://www.foaaweb.com/blog%20caixa%20forum%20esp.html>. [Último acceso: 27 Abril 2015].
- [16] «Direct Industry,» [En línea]. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/romi/torno-convencionales-rigido-26465-89513.html>. [Último acceso: 2 Mayo 2015].
- [17] «Mecalux logismarket,» [En línea]. Disponible en: <http://www.logismarket.com.ar/burani/fresadora-de-mesa-monofasica/1848551031-1179609140-p.html>. [Último acceso: 2 Mayo 2015].
- [18] «Ferromega Importaciones,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ferromega.com.bo/?product=taladros-de-banco-industrial>. [Último acceso: 2 Mayo 2015].
- [19] L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez y A. Lamikiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento: procesos de arranque*, Bilbao: Ediciones Técnicas Izaro, 2004.
- [20] M. H. Miguélez Garrido, J. A. Canteli Fernández y J. L. Cantero Guisández, *Problemas resueltos de Tecnología de Fabricación*, Madrid: Thomson, 2005.
- [21] «Abaqus Example Problems Manual,» [En línea]. Disponible en: [http://xn--90ajn.xn--plai/library/abaqus\\_doc/Documentation/docs/v6.12/books/exa/default.htm?startat=ch05s01aex119.html](http://xn--90ajn.xn--plai/library/abaqus_doc/Documentation/docs/v6.12/books/exa/default.htm?startat=ch05s01aex119.html). [Último acceso: 30 Abril 2015].
- [22] S. W. Swapnagandha, A. P. Kulkarni y V. G. Sargade, «Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts,» *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 907-914, 2013.



- [23] W. Grzesik y P. Nieslony, «A computational approach to evaluate temperature and heat partition in machining with multilayer coated tools,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, n° 13, pp. 1311-1317, 2013.
- [24] M. Bakkal, A. J. Shih y R. O. Scattergood, «Chip formation, cutting forces, and tool wear in turning of Zr-based bulk metallic glass,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, n° 9, pp. 915-925, 2004.
- [25] S. Kumar Nayak, J. Kumar Patro, S. Dewangan y S. Gangopadhyay, «Multi-Objective Optimization of Machining Parameters During Dry,» *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 701-708, 2014.
- [26] A. P. Kulkarni, G. G. Joshi y V. G. Sargade, «Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using AlTiCrN Coated Insert Produced by HPPMS Technique,» *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 737-746, 2013.
- [27] I. Korkut, M. Kasap, I. Ciftci y U. Seker, «Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel,» *Materials & Design*, vol. 25, n° 4, pp. 303-305, 2004.
- [28] A. Maurel-Pantel, M. Fontaine, S. Thibaud y G. J.C., «3D FEM simulations of shoulder milling operations on a 304L stainless steel,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 22, pp. 13-27, 2012.
- [29] S. Lee, F. Barthelat, J. W. Hutchinson y H. Espinosa, «Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials – Experiments and modeling,» *International Journal of Plasticity*, vol. 22, n° 11, pp. 2118-2145, 2006.
- [30] J. Simmons y D. Shockey, «Explicit Finite Element Modeling of Multilayer Composite Fabric for Gas Turbine Engine Containment Systems, Phase II, Update to Part 3: Material Model Development and Simulation Experiments,» Office of Aviation Research, Washington, D.C., 2010.